

# **Experimentelle Untersuchungen zur Mehrfachimpulsbelastbarkeit von Metalloxidvaristoren für Anwendungen in der elektrischen Energietechnik**

Vom Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik  
der Technischen Universität Darmstadt  
zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation

von

**Dipl.-Ing. Maximilian Nikolaus Tuczek**  
Geboren am 14. Mai 1982 in Frankfurt am Main

Referent: Prof. Dr.-Ing. V. Hinrichsen  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen

Tag der Einreichung: 17. Juni 2014  
Tag der mündlichen Prüfung: 12. November 2014

D17  
Darmstadt 2015

Bitte zitieren Sie dieses Dokument als:

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-43395

URL: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/43395>

Dieses Dokument wird bereitgestellt von tuprints,

E-Publishing-Service der TU Darmstadt.

<http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de>

[tuprints@ulb.tu-darmstadt.de](mailto:tuprints@ulb.tu-darmstadt.de)

Die Veröffentlichung steht unter folgender Creative Commons Lizenz:

*Namensnennung - Keine kommerzielle Nutzung - Keine Bearbeitung 3.0 Deutschland*



<http://creativecommons.org/licences/by-nc-nd/3.0/de/>



# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Hochspannungstechnik der Technischen Universität Darmstadt.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. V. Hinrichsen, der mir die Möglichkeit zur Promotion gab und mich als Doktorvater mit sehr viel Feingefühl angeleitet und unterstützt hat. In den offenen fachlichen Diskussionen habe ich sehr viel gelernt und die Entfaltungsmöglichkeiten haben den Raum für unkonventionelle Lösungsansätze eröffnet. Das entgegengebrachte Vertrauen und die Einführung in die internationalen Arbeitsgruppen haben nicht nur meine fachliche Weiterentwicklung unterstützt was ich sehr zu schätzen weiß und wofür ich ihm besonders danken möchte.

Herrn Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen möchte ich für die bereitwillige Übernahme des Korreferats, die gewissenhafte Durchsicht der Arbeit und die Anmerkungen und Hinweise danken.

Des Weiteren bedanke ich mich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung der Untersuchungen und bei den Projektpartnern für deren Unterstützung und die spannenden fachlichen Diskussionen. Die Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Fachgebieten hat die Forschungsarbeit sehr bereichert.

Den Mitgliedern der Cigré-Arbeitsgruppe WG A3.25 möchte ich für die Begleitung meiner Forschung danken. Den aufschlussreichen und offenen Diskussionen konnte ich viele Informationen entnehmen und die unkomplizierte Bereitstellung von Prüflingen hat viele Untersuchungen erst möglich gemacht.

Einen großen Anteil an dem Gelingen der Arbeit hatten die Studenten, die in Form von Studien-, Diplom-, Bachelor- und Masterarbeiten oder umfangreichen „Hiwi-Tätigkeiten“ die Untersuchungen vorantrieben. Dank ihrer fleißigen und gewissenhaften Arbeitsweise sind sehr viele und sehr gute Ergebnisse entstanden.

Bei den ehemaligen und derzeitigen technischen, administrativen und wissenschaftlichen Mitarbeitern des Fachgebiets Hochspannungstechnik möchte ich mich für die Zusammenarbeit bedanken. Die vielfältige Unterstützung, Gedankenanstöße und kollegiale Hilfe haben die Durchführung der zahlreichen Projekte entscheidend beeinflusst. Hervorheben möchte ich Herrn Dr.-Ing. M. Reinhard, der mir durch seine Einarbeitung zu einem sehr guten Start in das Projekt verholfen hat.

## *Vorwort*

Insbesondere möchte ich mich auch bei den Lesern des Manuskriptes und hier besonders R. Baraki, M. Bröker, M. Gießel, Dr. F. Greuter, C. Mandel, Prof. Dr.-Ing. N. Möhring, G. Tuzek und K. Tuzek für die inhaltlichen und orthographischen Hinweise bedanken, die die Arbeit abgerundet haben.

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie, insbesondere meinen Eltern, welche mich während meines Lebenswegs auf vielfältige Art und Weise unterstützten und mir somit einen wissenschaftlichen Werdegang ermöglicht haben.

Meiner Frau Lydia möchte ich für das Verständnis und die Rückendeckung während der Promotion und besonders während der Erstellung der Arbeit danken!

Darmstadt, im Dezember 2014

Maximilian N. Tuzek

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>3</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>9</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>11</b>
<b>Abstract</b>	<b>13</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>15</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>17</b>
<b>2 Energieaufnahmevermögen von MO-Varistoren – Stand des Wissens</b>	<b>21</b>
2.1 Einsatz von MO-Varistoren in Überspannungsableitern . . . . .	21
2.2 Wirkungsweise und Herstellung von MO-Varistoren . . . . .	24
2.3 Arten des Energieaufnahmevermögens . . . . .	36
2.3.1 Thermisches Energieaufnahmevermögen . . . . .	37
2.3.2 Impulsenergieaufnahmevermögen . . . . .	38
2.4 Mechanische Schädigungen . . . . .	40
2.5 Stand des Wissens zum Einzel- und Mehrfachimpulsenergieaufnahmevermögen	41
2.6 Stand der internationalen Überspannungsableiter-Normung in IEC und IEEE	49
<b>3 Motivation und Ziele der Arbeit</b>	<b>53</b>
<b>4 Verwendete Versuchseinrichtungen</b>	<b>57</b>
4.1 Prüflingsaufnahme . . . . .	57
4.2 Wechselstromprüfsystem . . . . .	59
4.3 Rechteckimpulsgenerator . . . . .	60
4.4 Doppel exponentialstoßstromgenerator . . . . .	64
4.5 Referenzspannungsmesssystem . . . . .	66
4.6 Alterungsprüfsystem . . . . .	69
<b>5 Impulsbelastbarkeit von MO-Varistoren</b>	<b>71</b>
5.1 Einzelimpulsbelastbarkeit von MO-Varistoren . . . . .	74

5.2	Einfluss der Temperaturabhängigkeiten auf das Energieaufnahmevermögen .	88
5.2.1	Bestimmung der Temperaturabhängigkeit der <i>UI</i> -Kennlinie im Durchbruchbereich . . . . .	88
5.2.2	Stromaufteilung zwischen parallel belasteten MO-Varistoren . . . . .	95
5.2.3	Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen von MO-Varistoren bei erhöhter Umgebungstemperatur . . . . .	99
5.3	Doppelimpulsbelastbarkeit von MO-Varistoren . . . . .	102
5.4	Belastbarkeit von MO-Varistoren mit repetierenden Energieeinträgen . . . . .	106
5.4.1	Mehrfachbelastbarkeit mit Wechselstromenergieeinträgen . . . . .	107
5.4.2	Mehrfachbelastbarkeit mit Rechteckimpulsen . . . . .	112
5.4.3	Vergleich der Mehrfachbelastbarkeit unterschiedlicher Impulsformen gleicher Energiedichte . . . . .	117
5.4.4	Vergleich zweier Stückprüfverfahren . . . . .	134
5.5	Energieaufnahmevermögen von vorbeanspruchten MO-Varistoren . . . . .	136
5.5.1	Auswirkung der Kennlinienalterung auf das Impulsenergieaufnahmevermögen . . . . .	137
5.5.2	Rückbildung von Kennlinienänderungen im Betrieb bei anliegender Dauerspannung . . . . .	140
5.5.3	Energieaufnahmevermögen von im Betrieb gealterten MO-Varistoren	146
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>151</b>
6.1	Konsequenzen für den Einsatz von Überspannungsableitern . . . . .	155
6.2	Empfehlungen für die internationale Normung . . . . .	156
6.3	Ausblick . . . . .	159
	<b>Anhang</b>	<b>161</b>
<b>A</b>	<b>Zusatzinformationen zu den verwendeten Versuchsanlagen</b>	<b>161</b>
A.1	Wechselstromprüfsystem . . . . .	161
A.2	Rechteckimpulsgenerator . . . . .	165
A.3	Doppelexponentialstoßstromgenerator . . . . .	169
A.4	Referenzspannungsmesssystem . . . . .	173
A.5	Alterungsprüfsystem . . . . .	174
<b>B</b>	<b>Statistische Grundlagen</b>	<b>177</b>
B.1	Dichte- und Verteilungsfunktionen . . . . .	177
B.1.1	Normalverteilung . . . . .	177
B.1.2	Logarithmische Normalverteilung . . . . .	178
B.1.3	Doppelexponentialverteilung . . . . .	178
B.1.4	Weibullverteilung . . . . .	179
B.2	Maximum-Likelihood-Schätzer . . . . .	180

B.3 Multiple Level Method . . . . .	182
B.4 Progressive Stress Method . . . . .	184
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>189</b>
<b>Relevante Normen</b>	<b>197</b>
<b>Veröffentlichungen als Autor oder Co-Autor</b>	<b>199</b>
<b>Vom Autor betreute studentische Arbeiten</b>	<b>201</b>



# Symbolverzeichnis

$\Delta I_{12}$	A	Differenz der Ströme durch Prüfling 1 und Prüfling 2
$\Phi_B$	eV	Höhe der Potentialbarriere
$\alpha$	1	Nichtlinearitätsexponent
$\alpha$	1	Erster Weibullkoeffizient
$\beta$	1	Zweiter Weibullkoeffizient
$\zeta$	eV	Abstand des Leitungsbands zum Fermi-Niveau im spannungslosen Zustand
$\theta$	1	Parameter der Maximum-Likelihood-Funktion
$\theta_1$	1	Maximum-Likelihood-Parameter für den Erwartungswert ( $\hat{\theta}_1$ ist der Punktschätzer)
$\theta_2$	1	Maximum-Likelihood-Parameter für die Standardabweichung ( $\hat{\theta}_2$ ist der Punktschätzer)
$\mu$	1	Erwartungswert
$\sigma$	1	Standardabweichung
$C$	1	Konfidenzbereich
$C_{\text{int}}$	F	Kapazität eines MO-Varistors
$C_D$	F	Kapazität des Doppelexponentialstoßstromgenerators
$C_R$	F	Kapazität des Rechteckimpulsgenerators
$d$	m	Breite der Potentialbarriere im spannungslosen Zustand
$E_C$	eV	Leitungsband
$E_{F_n}$	eV	Fermi-Niveau der Grenzsicht
$E_F$	eV	Fermi-Niveau
$E_V$	eV	Valenzband
$F_d(x)$	1	Dichtefunktion der Doppelexponentialverteilung
$F_1(x)$	1	Verteilungsfunktion der logarithmischen Normalverteilung
$F_N(x)$	1	Verteilungsfunktion der Normalverteilung
$F_{w2}(t)$	1	Verteilungsfunktion der zweiparametrischen Weibullverteilung
$F_{w3}(t)$	1	Verteilungsfunktion der dreiparametrischen Weibullverteilung
$f_d(t)$	1	Verteilungsfunktion der Doppelexponentialverteilung

<sup>1</sup> Die Einheit der statistischen Größe richtet sich nach der Einheit des untersuchten Merkmals.

## 0 Symbolverzeichnis

$f_1(t)$	1	Dichtefunktion der logarithmischen Normalverteilung
$f_{w2}(t)$	1	Dichtefunktion der zweiparametrischen Weibullverteilung
$f_{w3}(t)$	1	Dichtefunktion der dreiparametrischen Weibullverteilung
$I$	A	Elektrische Stromstärke
$J$	A/cm <sup>2</sup>	Stromdichte
$\hat{J}_{ch}$	mA/cm <sup>2</sup>	Scheitelwert der Stromdichte, bei der die charakteristische Spannung gemessen wird
$K$	1	Level der Maximum-Likelihood-Funktion
$k_j$	1	Anzahl der Ausfälle der Klasse $j$
$L$	1	Maximum-Likelihood-Funktion
$L_b$	H	Induktivität eines MO-Varistors
$L_D$	H	Induktivität des Doppexponentialstoßstromgenerators
$L_{MLM}(\theta_1, \theta_2)$	1	Maximum-Likelihood-Funktion für MLM
$L_{PSM}(\theta_1, \theta_2)$	1	Maximum-Likelihood-Funktion für PSM
$L_R$	H	Induktivität des Rechteckimpulsgenerators
$m_j$	1	Anzahl der Prüflinge der Klasse $j$
$n_t$	1	Dichte der gebundenen Ladungsträger
$R_g$	$\Omega$	Serienwiderstand eines MO-Varistors
$R_{int}$	$\Omega$	Spannungsabhängiger Widerstand eines MO-Varistors
$R_D$	$\Omega$	Widerstand des Doppexponentialstoßstromgenerators
$r$	1	Freiheitsgrad
$T$	°C	Temperatur
$t$	s	Zeit
$t_0$	1	Startwert der drei Parametrischen Weibullverteilung
$U$	V	Elektrische Spannung
$U_{ch}$	V	Scheinbarer Effektivwert ( $\frac{\hat{U}}{\sqrt{2}}$ ) der „charakteristischen Spannung“ bei einem Scheitelwert der Stromdichte von $\hat{J}_{ch} = 0,12 \text{ mA/cm}^2$
$U_c$	kV	Dauerspannung eines Überspannungsableiters
$U_{DVM}$	V	Spannung, die an das Digitalvoltmeter übertragen wird
$U_{Mes}$	V	Spannung am Niederspannungsteil des Spannungsteilers
$\hat{U}_{res}$	kV	Restspannung bei Belastung mit einem Blitzstoßstrom der Form $8/20 \mu\text{s}$ mit einem Stromscheitelwert von 10 kA
$W$	J/cm <sup>3</sup>	Eingebrachte Energie
$w_j$	1	Anzahl der Prüfling der Klasse $j$ die dem Energieeintrag standgehalten haben

---

<sup>1</sup> Die Einheit der statistischen Größe richtet sich nach der Einheit des untersuchten Merkmals.



# Abkürzungsverzeichnis

AC	„alternating current“, Wechselstrom
CR	„cracking“, Zerbrechen
DC	„direct current“, Gleichstrom
DESS	Doppelexponentialstoßstrom
EGLA	„externally gapped line arrester“, Leitungsableiter mit externer Funkenstrecke
FACTS	„Flexible-AC-Transmission-System“, flexibles Drehstromübertragungssystem
FO	„flashover“, Überschlag
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GIS	Gasisolierte metallgekapselte Schaltanlage
HGÜ	Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench
LD	„long duration current impulse“, Rechteckimpuls
MF	„mechanical failure“, mechanischer Fehler
MO	Metalloxid
NGLA	„non gapped line arrester“, Leitungsableiter ohne externe Funkenstrecke
NTC	Negativer Temperaturkoeffizient
PC	Personal Computer
PTC	Positiver Temperaturkoeffizient
PU	„puncture“, Durchschlag
TOV	„temporary overvoltage“, zeitweilige, betriebsfrequente Überspannung



# Abstract

In this thesis, the results of the research on multiple impulse energy handling capability of metal-oxide varistors (MOVs) are described. The focus here is on repetitive impulse stresses with a high energy density where the specimens cool down to ambient temperature after each energy injection. The repetitive energy injection handling capability of MOVs is compared to their single impulse handling capability.

It is widely known that the single impulse energy handling capability of MOVs increases with the current density of the impulse stress. This is due to the homogeneous current distribution within MOVs when applying higher current densities. The findings described in this thesis suggest that the temperature dependence of electrical resistance causes a further homogenization of the current distribution within the material of the MOVs at higher current densities. However, the impact of this seems to be small as its influence on the single impulse energy handling capability of the MOVs is not measurable. Furthermore, the results of experiments conducted for this thesis show that short interruptions of a long-duration current impulse stresses up to the range of seconds do not increase the impulse energy handling capability of MOVs.

Additionally, the research results illustrate that the repetitive impulse energy handling capability of MOVs does not correlate with their single impulse energy handling capability. Concerning repetitive energy injections at lower current densities, the stress handling capability is very close to the single impulse energy handling capability. However, repetitive impulse stresses with higher current densities cause a reduced stress handling capability compared to the single impulse energy handling capability. Nonetheless, the energy handling capability when applying repetitive energy injections does not drop below the characteristic volume-related nominal energy handling capability of standard surge arresters. With regard to these findings, it is also shown that a change in reference voltage due to prior repetitive stressing of the MOV is not a sure sign for a pre-damage that leads to a decrease in single impulse energy handling capability.

The results gained from this research are discussed with regard to routine tests of MOVs, the usage of surge arresters within electric power systems and the international standardization of surge arresters.



# Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit berichtet über Untersuchungen zur Mehrfachimpulsbelastbarkeit von Metalloxid-Varistoren (MO-Varistoren). Der Schwerpunkt der Untersuchungen liegt dabei auf repetierenden Belastungen hoher Energiedichte, bei denen die Prüflinge zwischen den Belastungen auf Umgebungstemperatur abkühlen. Die Belastungsfähigkeit mit repetierenden Energieeinträgen wird mit jener bei Einzelimpulsbelastungen verglichen.

Wie bekannt ist, steigt das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen mit zunehmender Stromdichte der Belastung an. Dies lässt sich auf eine homogenere Stromverteilung im MO-Varistor bei höheren Stromdichten zurückführen. Die in der vorliegenden Arbeit vorgestellten Untersuchungen deuten darauf hin, dass bei hohen Stromdichten die Temperaturabhängigkeit des Widerstandes der MO-Varistoren zu einer weiteren Homogenisierung der Stromverteilung im Material führt. Der Effekt scheint jedoch so gering zu sein, dass er keinen messbaren Einfluss auf das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen hat. Weiterhin wird durch experimentelle Untersuchungen nachgewiesen, dass kurze Unterbrechungen von Rechteckimpulsenergieeinträgen bis in den Sekundenbereich das Impulsenergieaufnahmevermögen von MO-Varistoren nicht erhöhen.

Die vorgestellten Untersuchungen zeigen weiterhin, dass die Belastungsfähigkeit von MO-Varistoren bei repetierenden Energieeinträgen nicht mit dem Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen korreliert. Bei geringen Stromdichten liegt sie sehr nahe an dem Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen. Bei größeren Stromdichten steigt die Differenz, die Belastungsfähigkeit bei repetierenden Energieeinträgen sinkt jedoch nicht unter den Wert des typischen volumenbezogenen Nennenergieaufnahmevermögens von Standard-Überspannungsableitern. In diesem Zusammenhang wird weiterhin nachgewiesen, dass eine Referenzspannungsänderungen infolge von repetierenden Vorbelastungen kein sicheres Indiz für Vorschädigungen ist, die zu einer Verringerung des Einzelimpulsenergieaufnahmevermögens führen.

Die gewonnenen Erkenntnisse werden in Bezug auf die Stückprüfung von MO-Varistoren, den Einsatz von Überspannungsableitern in elektrischen Energieversorgungsnetzen und die Weiterentwicklung der internationalen Normung für Überspannungsableiter diskutiert.



# 1 Einleitung

Um Betriebsmittel in den Netzen der Mittel- und Hochspannungstechnik vor Überspannungen zu schützen, haben sich Überspannungsableiter mit einem Aktivteil aus Metalloxid-Varistoren (MO-Varistoren) international durchgesetzt. Aufgrund des steigenden Kostendrucks am Markt und der großen Herausforderungen in neuen Netzkonstellationen (wie z. B. in „Ultra High Voltage“-Netzen), werden Überspannungsableiter immer häufiger in Grenzbereichen<sup>2</sup> ausgelegt und betrieben. Damit Überspannungsableiter in Grenzbereichen wiederholt sicher Überspannungen begrenzen können, sind neue Erkenntnisse zum Verhalten von Überspannungsableitern bei Grenzbelastungen notwendig.

Überspannungen können beispielsweise durch Schalthandlungen im Netz, Fehler im Netzbetrieb oder atmosphärische Einwirkungen (z. B. Blitzenentladungen) auftreten. Je nach Art des Ereignisses können diese Überspannungen als Einzel- oder (z. B. sehr häufig bei Blitzenentladungen) als Mehrfachereignis auftreten (siehe z. B. [Cig13a] und [Cig13b]). Da ein Überspannungsableiter im Betrieb mehrfach Überspannungsereignisse begrenzen muss, ist sowohl die Einfach- als auch die Mehrfachbelastbarkeit von MO-Varistoren von Interesse. Neben den Veränderungen, die Energieeinträge in MO-Varistoren verursachen, wird durch den Ableitvorgang Wärme im Überspannungsableiter umgesetzt. Solange die Wärme noch nicht an die Umgebung abgegeben wurde, reduziert der Temperaturanstieg in den MO-Varistoren das Energieaufnahmevermögen bei einer Folgebeanspruchung.

Die stark nichtlineare  $UI$ -Kennlinie (die in Kapitel 2.2 näher beschrieben wird) ermöglicht einen breiten Einsatzbereich, in der Regel ohne Serienfunkenstrecke, was die Schutzwirkung positiv beeinflusst. Ein Nachteil der starken Nichtlinearität ist, dass sich bei bestimmten Energieeintragsarten der Strom im MO-Varistor nicht homogen verteilt, was das Energieaufnahmevermögen deutlich herabsetzen kann (wie u. a. in [Bar01], [He07] und Kapitel 5.2 gezeigt wird). Zusätzliche Faktoren, wie die Temperaturabhängigkeit der  $UI$ -Kennlinie und mikroskopische Veränderungen der Ladungsträgerverteilungen durch Energieeinträge (wie z. B. in [Stu87] beschrieben), verändern bereits, bevor makroskopische mechanische

<sup>2</sup> Die Grenzbereiche beziehen sich hierbei sowohl auf die unterschiedlichen Arten des Energieaufnahmevermögens als auch auf Belastungsarten (wie zeitweilige Überspannungen), bei denen das Energieaufnahmevermögen prinzipbedingt besonders gering ist.

## 1 Einleitung

Fehler eintreten, die elektrischen Eigenschaften des MO-Varistors. Aus diesen Gründen ist eine zentrale Kenngröße des MO-Varistors, „das Energieaufnahmevermögen“<sup>3</sup>, von vielen Faktoren abhängig, die noch nicht alle bekannt, bzw. deren Einfluss und Wechselwirkung noch nicht hinreichend untersucht sind.

Unter welchen Bedingungen ein Energieeintrag reversible oder irreversible Veränderungen erzeugt, bzw. unter welchen Bedingungen ein MO-Varistor infolge von Energieeinträgen altert oder ermüdet, ist nicht nur für die Auslegung und den Betrieb eines Überspannungsableiters von Interesse. Auch z. B. für die Stückprüfung am Ende des Produktionsprozesses sind diese Erkenntnisse von entscheidender Bedeutung, da hier MO-Varistoren mit Fehlstellen durch einen zerstörenden Energieeintrag sicher erkannt, jedoch fehlerfreie MO-Varistoren bei gleichem Energieeintrag nicht vorgeschädigt werden sollen.

In vorangegangenen experimentellen Arbeiten (wie in Kapitel 2.5 beschrieben) wurde vorrangig neben dem Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen die Ermüdung von MO-Varistoren durch Stoßstromimpulse hoher Stromdichte und Stromsteilheit untersucht. Der Großteil der experimentellen Untersuchungen der hier vorliegenden Arbeit befasst sich mit Energieeinträgen unterschiedlicher Stromdichte und geringer Stromsteilheit, jedoch mit Energieinhalten bis hin zur Überlastung der untersuchten MO-Varistoren. Dieser Bereich der Energieeinträge wurde bislang nur wenig systematisch untersucht, ist jedoch (aufgrund der anfangs dargestellten Problematik) von großer Bedeutung.

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des Projektes „Impuls-Energieaufnahmevermögen von Metalloxidvaristoren für Überspannungsableiter in Hochspannungsnetzen“, das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert wird. In diesem Projekt ist neben dem Fachgebiet „Hochspannungstechnik“ (Prof. Dr.-Ing. Volker Hinrichsen) auch das Institut „Theorie Elektromagnetischer Felder“ (Prof. Dr.-Ing. Thomas Weiland) und das Fachgebiet „Nichtmetallische-Anorganische Werkstoffe“ (Prof. Dr.-Ing. Jürgen Rödel) vertreten. Weiterhin wurden die Untersuchungen von der Cigré-Arbeitsgruppe A3.25 „MO varistors and surge arresters for emerging system conditions“ begleitet, in der der Autor Mitglied war.

Diese Arbeit beschreibt zunächst den Aufbau sowie die Funktion von Überspannungsableitern und den darin enthaltenen MO-Varistoren. Daran schließt sich die Beschreibung des Wissensstandes und der Normung zum Impulsenergieaufnahmevermögen an, woraus im nächsten Abschnitt die Motivation und die Ziele der Arbeit abgeleitet werden. Im Anschluss daran werden die verwendeten Versuchseinrichtungen beschrieben (genauere Angaben zu den verwendeten Versuchskreisen, der Messtechnik und deren Messunsicherheiten

---

<sup>3</sup> Aufgrund der unterschiedlichen Wirkmechanismen werden unterschiedliche Arten des Energieaufnahmevermögens unterschieden, die in Kapitel 2.3 vorgestellt werden.



befinden sich im Anhang in Kapitel A). Die Untersuchungen und die daraus resultierenden Erkenntnisse stellen die anschließenden Abschnitte vor, wobei der Schwerpunkt nach der Beschreibung des Einzelimpulsenergieaufnahmevermögens auf den Auswirkungen von repetierenden (bei dem die Prüflinge zwischen den Belastungen bis auf Umgebungstemperatur abkühlen) Mehrfachimpulsbelastungen verschiedener Energieeintragsarten liegt. Das beobachtete Verhalten wird jeweils am Ende des entsprechenden Abschnitts interpretiert. Den Abschluss bildet eine Zusammenfassung, in der die Ergebnisse und Schlussfolgerungen der Arbeit zusammengeführt werden. In dieser werden auch die Konsequenzen der Untersuchungsergebnisse diskutiert, sowie Empfehlungen für die Weiterentwicklung der relevanten internationalen Normen und für zukünftige Untersuchungen gegeben.

Im Anhang der Arbeit werden die verwendeten Versuchsanordnungen ausführlich beschrieben. Es sei darauf hingewiesen, dass zur besseren Zuordnung das Literaturverzeichnis auf vier getrennte Verzeichnisse aufgeteilt ist.



## 2 Energieaufnahmevermögen von MO-Varistoren – Stand des Wissens

In diesem Kapitel werden der typische Aufbau und die für die Verwendung in Überspannungsableitern wichtigen Eigenschaften von MO-Varistoren beschrieben. Dieser Abschnitt kann in der Kürze keine allumfassende Darstellung bieten und muss sich daher auf die Bereiche beschränken, die im späteren Verlauf der Arbeit von Relevanz sind. Anschließend werden die verschiedenen Arten des elektrischen Energieaufnahmevermögens, die in unterschiedlichen praktischen Anwendungen auftreten, differenziert. Mit dieser Kenntnis wird im Folgenden auf den Stand des Wissens zum Einzel- und Mehrfachimpulsenergieaufnahmevermögen eingegangen. Hierbei werden sowohl experimentelle Untersuchungen als auch Erkenntnisse, die durch Simulationen gewonnen wurden, vorgestellt. Den Abschluss dieses Abschnitts bildet die Darstellung des Standes der internationalen Normung, da sich in dieser die aktuellen Diskussionen der Hersteller und Anwender zum Energieaufnahmevermögen widerspiegeln.

### 2.1 Einsatz von MO-Varistoren in Überspannungsableitern

(vgl. [ABB11], [Cig13a] und [Hin11])

Zum Begrenzen von Überspannungen müssen Überspannungsableiter elektrische Energie aufnehmen und in Wärme wandeln. Diese Aufgabe übernimmt in modernen Überspannungsableitern der Aktivteil, der aus einer Säule von MO-Varistoren besteht. Die MO-Varistoren werden von den unter Umständen extremen Umgebungsbedingungen durch ein Gehäuse geschützt, wobei sich je nach Anwendungsgebiet und Spannungsebene unterschiedliche Designs der Überspannungsableiter durchgesetzt haben. Prinzipiell unterscheidet man bei luftisolierten Überspannungsableitern zwischen *direkt vergossenen* und solchen im *Rohrdesign*<sup>4</sup> (*gasisolierte* Überspannungsableiter werden am Ende dieses Kapitel behan-

<sup>4</sup> Es sind auch Mischformen der beiden Designs bekannt. Auf deren Beschreibung wird in dieser grundsätzlichen Darstellung jedoch verzichtet.

delt). In *Abbildung 2.1* sind diese beiden Designs nebeneinander dargestellt<sup>5</sup>. Beim direkt vergossenen Design besteht das Gehäuse aus einem synthetischen Polymer, das auf die MO-Varistoren aufgespritzt wird. Bei dem Rohrdesign hingegen umgibt ein röhrenförmiges Gehäuse, das typischerweise aus Porzellan oder Glasfaserverstärktem Kunststoff -im folgenden GFK genannt- mit aufgespritztem synthetischem Polymer besteht, die MO-Varistorsäule. Durch GFK-Stangen und, je nach Anforderung, zusätzliche Bandagierung wird beim direkt vergossenen Design die gewünschte mechanische Festigkeit erreicht. Im Rohrdesign wird die mechanische Festigkeit durch den Hohlisolator sichergestellt. Die mit GFK-Stangen verspannte MO-Varistorsäule, die häufig mit einer Feder im Gehäuse verspannt ist, trägt hierzu nicht bei. Das Gehäuse soll die MO-Varistoren vor Umwelteinflüssen wie Feuchtigkeit und Verschmutzung schützen. Erfordern die nötigen Schlagweiten und Kriechwege (siehe [IEC60099-4]) ein längeres Gehäuse als für die MO-Varistorsäule notwendig wäre, wird die Differenz üblicherweise mit metallischen Füllstücken<sup>6</sup> aufgefüllt. Prinzipbedingt besteht beim Rohrdesign zwischen MO-Varistorsäule und Gehäuse ein Raum, der typischerweise mit Stickstoff oder trockener Luft (selten mit Feststoffen oder Schwefelhexafluorid ( $\text{SF}_6$ )) gefüllt ist, der hermetisch für die gesamte Lebensdauer gegen die Umgebung abgedichtet werden muss. Das Dichtsystem muss andererseits im Falle einer Überlastung des Aktivteiles durch den entstehenden Überdruck sehr schnell öffnen und so ein Bersten des Gehäuses verhindern.

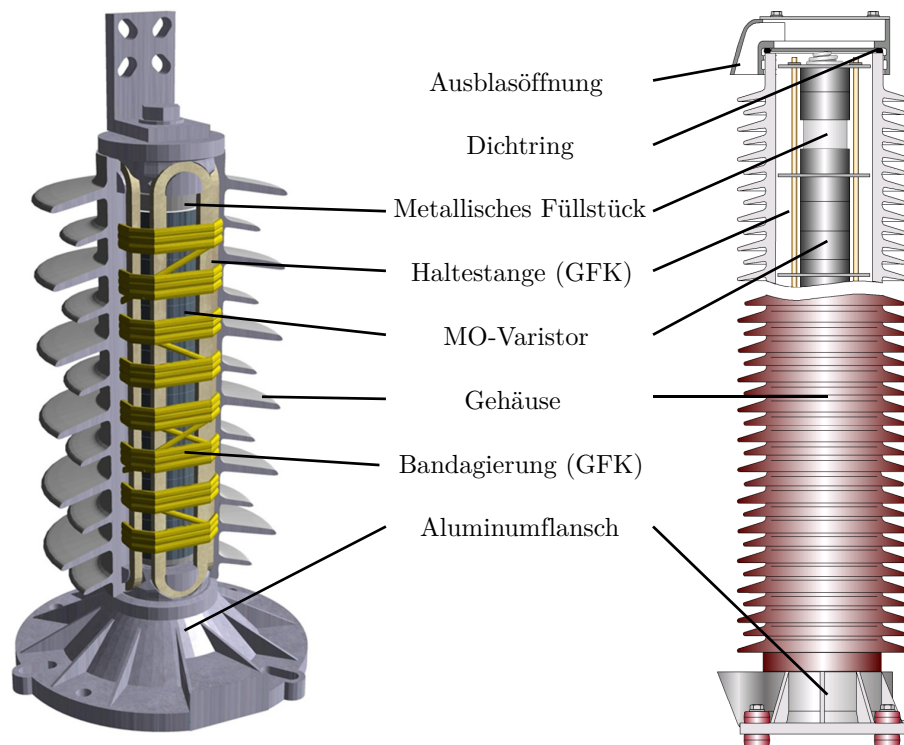
Überspannungsableiter für Mittelspannungsanwendungen werden Hersteller übergreifend fast ausnahmslos im kostengünstigeren direkt vergossenen Design hergestellt. Neben diesen Designs sollen spezielle, internationale Bauformen und Anwendungen nicht unerwähnt bleiben:

**Gasisolierte Überspannungsableiter** werden in gasisolierten Schaltanlagen (GIS) eingesetzt. GIS werden mittels eines Gases oder Gasgemisches mit dem Hauptbestandteil  $\text{SF}_6$  isoliert. Dieses Gas umgibt auch die MO-Varistorsäule in gasisolierten Überspannungsableitern. Durch das geringere Überschlagsrisiko bei dem Betrieb von MO-Varistoren in  $\text{SF}_6$  können hier MO-Varistoren mit höherer Feldstärke eingesetzt werden, was konstruktive Vorteile haben kann.

**Leitungsableiter** dienen der Begrenzung von Überspannungen auf Freileitungen. Es wird zwischen Leitungsableitern mit und ohne Serienfunkenstrecke unterschieden. Bei Leitungsableitern mit Serienfunkenstrecke (externally gapped line arrester: EGLA) liegt die betriebsfrequente Wechselspannung nicht über der MO-Varistorsäule an, sondern

<sup>5</sup> Die Quellen sind zufällig gewählt, sowohl Siemens als auch ABB stellen auch Überspannungsableiter im jeweils anderen Design her.

<sup>6</sup> In speziellen Anwendungen werden unter Umständen gezielt mehrere metallische Füllstücke eingesetzt, um das Energieaufnahmevermögen zu erhöhen, siehe dazu Kapitel 2.3.1.



**Abbildung 2.1:** Beispiel von Überspannungsableitern der Hochspannungsebene. Links im Bild ein *direkt vergossener* und rechts ein Überspannungsableiter im *Rohrdesign*. Quelle links: ABB ©ABB AG, Quelle rechts: Siemens ©Siemens AG

fällt praktisch ausschließlich über der Serienfunkenstrecke ab, weshalb nach einem Überspannungsereignis keine thermischen Stabilitätsprobleme (siehe Kapitel 2.3) auftreten können. Funkenstreckenlose Leitungsableiter (non gapped line arrester: NGLA) verhalten sich wie Standard-Überspannungsableiter, sind jedoch häufig mit Abtrennvorrichtungen ausgestattet<sup>7</sup>.

**Steckableiter** werden z. B. in Schaltanlagen im Mittel- und Hochspannungsbereich eingesetzt und zeichnen sich konstruktiv durch ein geerdetes Gehäuse und ein Anschlusssystem aus, das ein leichtes Auswechseln ermöglicht.

**Überspannungsableiter in leistungselektronischen Anwendungen** werden bisweilen kontinuierlich mit hohen Stromspitzenwerten geringer Energiedichte bzw. unkonventionellen Stromformen belastet. Beispielsweise in der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) werden Überspannungsableiter in Umrichterstationen zur Begrenzung von Überspannungen in den Umrichtertürmen oder den Filterkreisen eingesetzt<sup>8</sup>.

<sup>7</sup> Für weitere Informationen zu Leitungsableitern sei [Cig10] empfohlen.

<sup>8</sup> Dem [IEC-37/417/FDIS] sind unterschiedliche Einsatzgebiete und Belastungsformen zu entnehmen.

**Überspannungsableiter in Öl** werden in ölisolierte Transformatoren eingebaut, sodass die MO-Varistorsäule direkt vom Isolieröl umgeben ist. Hierbei schützen die Überspannungsableiter die Regelwicklungen von Transformatoren, in den USA und Japan aber auch die Primärwicklungen von Transformatoren der Mittelspannungsebene (siehe [Cig13a] und [Ish04]). In beiden Fällen werden die MO-Varistoren naturgemäß bei höheren Temperaturen, der Transformatoröltemperatur, betrieben.

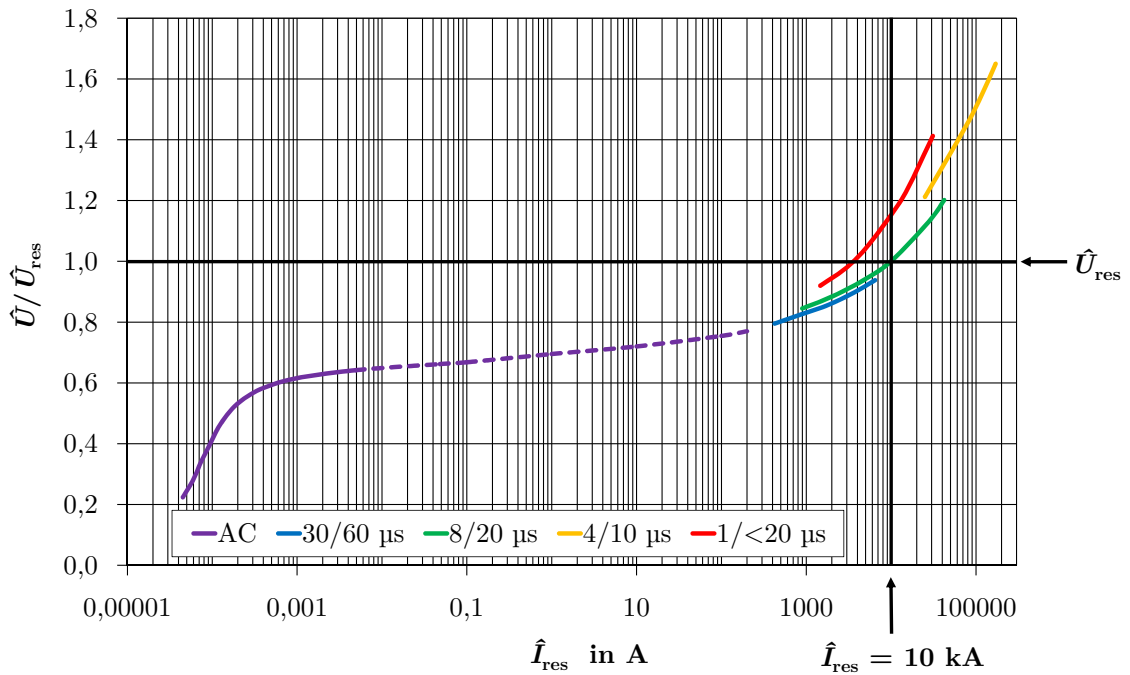
**Überspannungsableiter zum Schutz von Kondensatoren** werden z. B. in flexiblen Drehstromübertragungssystemen (flexible-AC-Transmission-System: FACTS) eingesetzt. Kommt es in einem Energieversorgungsnetz mit Serienkompensationsanlage zu einem Erdfehler, müssen in der betroffenen Phase die Serienkondensatoren vor dem betriebsfrequenten Kurzschlussstrom geschützt werden. Dies wird durch parallel zu den Kondensatoren geschaltete Überspannungsableiterbänke mit mehreren parallelen MO-Varistorsäulen (in einigen Fällen bis zu hundert) erreicht. Diese nehmen die Energie bis zum Abschalten des Fehlers (bzw. Kurzschließen der Kondensatoren) auf bzw. bieten dem Strom einen parallelen Strompfad (vgl. [IEC60143-2]). In diesem Einsatzbereich werden die MO-Varistoren fast ausschließlich durch Energieeinträge mit betriebsfrequenter Wechselspannung belastet. Thermische Stabilität (siehe Kapitel 2.3) ist in dieser Anwendung kein Auslegungskriterium, jedoch werden speziell in dieser Anwendung die MO-Varistoren häufig bis in den Grenzbereich ihres Energieaufnahmevermögens belastet.

## 2.2 Wirkungsweise und Herstellung von MO-Varistoren

(vgl. [Cig13a], [Cla99], [Eda89], [Gre90] und [Gup90])

MO-Varistoren werden wegen ihrer stark nichtlinearen  $UI$ -Kennlinie zur Überspannungsbegrenzung eingesetzt. Ein Beispiel einer solchen  $UI$ -Kennlinie ist in *Abbildung 2.2* dargestellt. In dieser Kennlinie ist der Scheitelwert der Spannung über dem logarithmisch dargestellten Stromscheitelwert aufgetragen. Dabei ist der Spannungsscheitelwert auf den Spannungsscheitelwert bei einem Stoßstromimpuls der Form  $8/20 \mu\text{s}$  mit einem Stromscheitelwert von  $10 \text{ kA}$  bezogen. Es sind nur der resistive Anteil des Stromes und der Spannung dargestellt, die kapazitiven und induktiven Komponenten werden üblicherweise durch entsprechende messtechnische Verfahren kompensiert (siehe hierzu [IEC60099-5] und [Rei08]).

Der Bereich sehr kleiner Stromstärken der  $UI$ -Kennlinie wird „Leckstrombereich“ genannt und zeichnet sich durch ein verhältnismäßig lineares Verhalten aus. Der Nichtlinearitätsex-



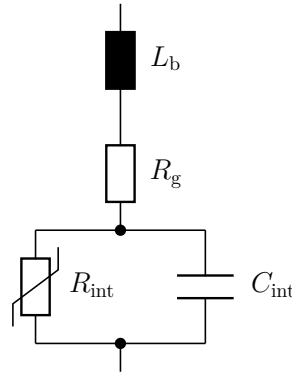
**Abbildung 2.2:** Prinzipdarstellung einer resistiven  $UI$ -Kennlinie eines MO-Varistors, wie er in Überspannungsableitern der Hochspannungsebene eingesetzt sein könnte. Die Spannungsscheitelwerte sind auf die Restspannung bei einem Stromscheitelwert von 10 kA normiert.

ponent  $\alpha$  ist nach Gleichung:

$$I \sim U^\alpha \quad (2.1)$$

definiert und liegt bei diesen Stromdichten im unteren einstelligen Bereich (z. B. spricht [Kle04] von  $\alpha \approx 1$ , [ABB11] von  $\alpha \leq 5$  und [Lev76] ebenfalls von  $\alpha \approx 1$ ). In diesem Bereich liegt typischerweise die Dauerspannung  $U_c$  eines Standard-Überspannungsableiters, die nach [IEC60099-5] etwa 5 % größer als die höchste, kontinuierlich anliegende Leiter-Erde-Spannung des Netzes sein sollte.

Im daran angrenzenden „gestrichelt“ gekennzeichneten Bereich größter Nichtlinearität nimmt  $\alpha$  zweistellige Werte an (z. B. spricht [Kle04] von  $\alpha \approx 30$  bis 70, [Sch94] von bis zu  $\alpha = 150$ , [ABB11] von  $\alpha \leq 50$  und [Lev76] ebenfalls von  $\alpha \approx 50$ ). Häufig sind die Werte von dargestellten  $UI$ -Kennlinien wie hier in diesem Bereich approximiert, da die Bestimmung dieser Kennlinienpunkte mit Wechsel- oder Gleichstrommessungen zu einer Zerstörung der MO-Varistoren führen würde und Doppel exponentialstoßstromkreise (siehe Kapitel 4.4) häufig nicht solch kleine Stromstärken erzeugen können. Überspannungsableiter werden



**Abbildung 2.3:** Ersatzschaltbild eines MO-Varistors (nach [Lev76])

in diesem Bereich der  $UI$ -Kennlinie nur betrieben, wenn zeitweilige, betriebsfrequente Überspannungen (temporary overvoltage: TOV) auftreten, oder beispielsweise für wenige betriebsfrequente Halbwellen beim Schutz von Serienkompensationsanlagen.

Im Bereich hoher Ströme sinkt  $\alpha$  wieder und nähert sich niedrigen einstelligen Werten an (z. B. spricht [Kle04] von  $\alpha \approx 1$ , [ABB11] von  $\alpha \leq 5$  und [Lev76] ebenfalls von  $\alpha \approx 1$ ). Die Kennlinie wird in diesem Bereich im Regelfall durch Doppelexponentialstoßströme ermittelt. Es ist zu erkennen, dass die gemessenen Spannungswerte von der Impulsform (der Stromsteilheit) abhängig sind, was an späterer Stelle dieses Kapitels diskutiert wird. Die Stromstärken in diesem Bereich können im realen Betrieb z. B. durch Blitzenladungen oder Schalthandlungen entstehen.

Abbildung 2.3 zeigt ein einfaches Ersatzschaltbild<sup>9</sup> eines MO-Varistors, mit dessen Hilfe sich bereits weite Bereiche der  $UI$ -Kennlinie veranschaulichen lassen. Dem spannungsabhängigen Widerstand  $R_{\text{int}}$  ist die Kapazität  $C_{\text{int}}$  parallel geschaltet. Diese beiden Komponenten beschreiben, wie im weiteren Verlauf des Kapitels erläutert wird, vornehmlich die Eigenschaften der Korngrenzen im MO-Varistor. Dabei ist die Kapazität spannungs-, temperatur- und frequenzabhängig. Einen Überblick über verschiedene Veröffentlichungen zu diesem Thema bietet z. B. [Had90]. In Reihe zu der Parallelschaltung aus  $R_{\text{int}}$  und  $C_{\text{int}}$  liegen der Widerstand  $R_g$  und die Induktivität  $L_b$ , die ebenfalls zur Beschreibung der Eigenschaften des MO-Varistors notwendig sind und nicht mit Ersatzkomponenten für Zuleitung o.ä. verwechselt werden dürfen [Lev76]. Vielmehr spiegeln die Serienkomponenten  $R_g$  und  $L_b$  die Eigenschaften der Körner der Keramik wider, wie später beschrieben wird.

Der Hauptbestandteil von MO-Varistoren ist Zinkoxid ( $\text{ZnO}$ ) mit ca. 90 % der Gesamtmasse. Die restlichen ca. 10 % teilen sich auf oxidische Additive auf, die die Nichtlinearität

<sup>9</sup> Einen Überblick über unterschiedliche Ersatzschaltbilder, die in der Literatur genannt werden, bietet z. B. [Had90].



der *UI*-Kennlinie einstellen, das Kornwachstum regulieren, die elektrische Stabilität des MO-Varistors sicher stellen oder den Produktionsprozess unterstützen. Die bekanntesten Additive und deren veröffentlichte Auswirkungen und Funktionen sind (ohne Anspruch auf Vollständigkeit) in *Tabelle 2.1* dargestellt.

Nicht alle der oben beschriebenen Additive werden tatsächlich auch in aktuellen MO-Varistoren eingesetzt. Die genaue Zusammensetzung ist u.a. an den Produktionsprozess des jeweiligen Herstellers angepasst und unterscheidet sich deshalb für die verschiedenen am Markt erhältlichen MO-Varistoren. Der Produktionsprozess (der im Folgenden nach der Vorlage von [Kle04], [Mic70] und [Cig13a] beschrieben wird) von heutigen MO-Varistoren ist ebenfalls von Hersteller zu Hersteller unterschiedlich, dennoch sind die Grundzüge gleich, und eben jene sollen nachfolgend vorgestellt werden.

**Tabelle 2.1:** Übersicht über die bekanntesten Additive und ihre Auswirkung/Funktion in MO-Varistoren

Additiv	Wirkung und Funktion
$\text{Al}_2\text{O}_3$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verbessert die Leitfähigkeit des <math>\text{ZnO}-\text{Al}_2\text{O}_3</math>-Korns [Car82]</li> <li>• Steigert die Nichtlinearität der <i>UI</i>-Kennlinie [Stu90]</li> </ul>
Ag, $\text{B}_2\text{O}_3$ , Ni und Glasschmelze	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verbessert die Stabilität [Eda88]</li> </ul>
$\text{Pr}_6\text{O}_{11}$ , SrO und $\text{U}_3\text{O}_8$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erzeugen oder verändern die Potentialbarriere wie <math>\text{Bi}_2\text{O}_3</math> (jedoch nicht mit der gleichen Intensität) [Eda88]</li> </ul>
BeO und $\text{TiO}_2$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unterstützen das Kornwachstum [Eda88]</li> </ul>
$\text{Bi}_2\text{O}_3$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Umgibt das ZnO-Korn und sorgt durch die Entstehung der Korngrenze für die Nichtlinearität der <i>UI</i>-Kennlinie [Eda88]</li> <li>• Steigert das Kornwachstum [Won80]</li> <li>• Unterstützt als Flussmittel das Flüssigphasensintern [Sch94]</li> <li>• Sorgt für eine homogene Verteilung der Dotierungsstoffe [Kle04]</li> <li>• Ist nicht für eine hohe Nichtlinearität verantwortlich [Kle04]</li> </ul>
CoO und MnO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verbessern die Nichtlinearität deutlich [Eda88]</li> </ul>

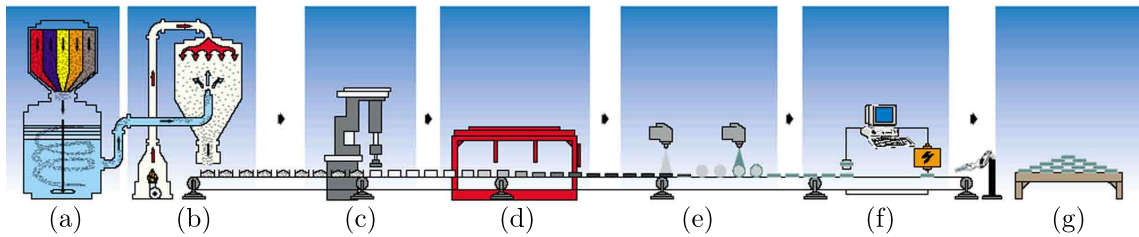
**Tabelle 2.1:** Übersicht über die bekanntesten Additive und ihre Auswirkung/Funktion in MO-Varistoren (*Fortsetzung*)

Additiv	Wirkung und Funktion
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verbessert die Nichtlinearität [Eda88]</li> <li>• Steigert die Stabilität [Eda88]</li> <li>• Begrenzt das Kornwachstum [FI08]</li> </ul>
Ga	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verbessert die Nichtlinearität, indem es Ladungsträger für das ZnO zur Verfügung stellt [Eda88]</li> </ul>
$\text{Nb}_2\text{O}_5$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verbessert die Nichtlinearität [Aso88]</li> <li>• Erhöht das Energieaufnahmevermögen [Aso88]</li> </ul>
$\text{Sb}_2\text{O}_3$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduziert das Kornwachstum [Eda88]</li> <li>• Unterstützt die Verschmelzung von ZnO und <math>\text{Bi}_2\text{O}_3</math> [Eda88]</li> <li>• Steigert die Stabilität gegen Impulsbelastungen [Eda88]</li> <li>• Verbessert die Mikrostruktur [Sch94]</li> </ul>
$\text{SiO}_2$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduziert das Kornwachstum [Eda88]</li> <li>• Verbessert die Mikrostruktur [Sch94]</li> </ul>

Der Produktionsprozess, wie er in *Abbildung 2.4* stark vereinfacht dargestellt ist, gliedert sich in sieben Schritte. Der Hauptbestandteil von MO-Varistoren ist mit etwa 90 % des Masseanteils ZnO. Die heute hauptsächlich verwendeten Additive sind nach [Cig13a]:  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ <sup>10</sup>,  $\text{Sb}_2\text{O}_3$ , CoO und MnO. Weitere Additive werden zum Teil im ppm-Bereich zugegeben. Die verwendeten Additive werden im ersten Arbeitsschritt nach Herstellerrezeptur abgewogen, gemischt und unter Umständen zermahlen, um eine homogenere Durchmischung zu erzielen (a). Der Mischvorgang wird häufig nass unter Zugabe von Lösungs- und Bindemitteln durchgeführt, da dies zu einer homogenen Verteilung<sup>11</sup> der Additive führt. In diesem Fall muss der Masse ein Großteil der Flüssigkeit z. B. in einem Sprühtrocknungsprozess vor dem nächsten Bearbeitungsprozess entzogen werden (b). Anschließend wird das erhaltene

<sup>10</sup> Es gibt Hinweise darauf, dass einzelne Hersteller am Markt an Stelle von  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  auf  $\text{Pr}_6\text{O}_{11}$  zurückgreifen.

<sup>11</sup> Eine homogene Verteilung der Additive zu erreichen, ist eine komplexe Aufgabe, da das prozentuale Volumen der Additive unter Umständen im ppm-Bereich liegt. Eine homogene Durchmischung der Additive ist jedoch entscheidend für die Qualität des End-Produkts [Cig13a].



**Abbildung 2.4:** Stark vereinfacht dargestellter Produktionsprozess von MO-Varistoren (nach [ABB11] ©ABB AG)

Pulver in einem Trockenpressverfahren (meistens uniaxial) in Form<sup>12</sup> gepresst, wobei das als „Grünling“ bezeichnete Produkt bereits 50 % bis 60 % der theoretisch erreichbaren Dichte erreicht hat (c). Die Grünlinge werden nach einem Entkokungsprozess, in dem die organischen Lösungs- und Bindemittel entfernt werden, in Luft gesintert. Der Temperaturverlauf ist herstellerabhängig und kann Spitzenwerte von bis zu 1450 °C erreichen (d). Während des Sintervorganges formieren sich durch Diffusionsvorgänge Körner und Korngrenzen. Für MO-Varistoren in Hochspannungsanwendungen werden im Sintervorgang Korngrößen<sup>13</sup> im Bereich von 10 µm bis 20 µm erzielt.

Nach einem definierten Abkühlprozess werden die stromdurchflossenen Stirnflächen der Varistoren geglättet, planparallel geschliffen und anschließend gut leitfähige metallische Elektroden aufgebracht (e). Hier hat sich Aluminium im Vergleich zum in [Mic70] genannten Silber durchgesetzt. Die Aluminiumschicht hat typischerweise eine Dicke von etwa 0,1 mm (siehe [Bog00]). Des Weiteren wird an der Mantelfläche eine Passivierungsschicht aufgetragen, die den Varistor vor Umwelteinflüssen (z. B. während der Lagerung) schützen und das Überschlagsverhalten bei hohen Stoßstromimpulsen verbessern soll. Üblicherweise werden hierfür Gläser verwendet, wobei durch die Temperatureinwirkung des Einbrennprozesses die Struktur des MO-Varistors an der Mantelfläche verändert werden kann. Deshalb werden bei niedrigen Temperaturen schmelzende Gläser eingesetzt, wobei laut [Dar97] zum Aufbringen der Metallisierung und der Glasur eine Temperatur von 500 °C benötigt wird. Der niedrige Schmelzpunkt wird häufig durch den Zusatz von Blei erreicht, was aus Gründen der Umweltverträglichkeit beim Entsorgen andererseits wieder unerwünscht ist. Gelegentlich wird auch mit Lacken als Passivierung gearbeitet.

<sup>12</sup> Für MO-Varistoren, die in Überspannungsableitern der Hochspannungstechnik eingesetzt werden, sind zylindrische Körper üblich, im Niederspannungsbereich werden auch andere Formen eingesetzt.

<sup>13</sup> Für spezielle Anwendungen von Überspannungsableitern sind/werden sogenannte „Hochfeldvaristoren“ entwickelt, die sich durch kleine Körner und höhere Durchbruchfeldstärken pro MO-Varistorhöhe auszeichnen. Diese werden z. B. in gasisolierten Überspannungsableitern (siehe Kapitel 2.1) eingesetzt (siehe z. B. [Kle04]). Für Anwendungen im Niederspannungsbereich (z. B. Automatisierungselektronik) werden MO-Varistoren mit nur einigen Volt Durchbruchsspannung benötigt. Für diese Anwendungen werden durch entsprechende Produktionsverfahren extra große Körner verwendet [Cla99].

Am Ende des Produktionsprozesses steht die Stückprüfung<sup>14</sup>, in der die Qualität und die elektrischen Eigenschaften der MO-Varistoren geprüft werden (f). Zur Prüfung der elektrischen Eigenschaften werden herstellerabhängig AC- und/oder DC-Referenzspannungen<sup>15</sup>, AC- und/oder DC-Verlustleistungen (nach Herstellerdefinitionen) sowie die Restspannung (definiert nach [IEC60099-4]) ausgemessen und zumeist in kodierter Form auf eine Varistorstirnfläche aufgedruckt. Zur Prüfung der Qualität, die maßgeblich von der Homogenität bestimmt wird, werden meist Rechteckimpulse, Hochstoßstromimpulse (beide definiert nach [IEC60099-4]) oder Sinushalbwellen mit Netzfrequenz eingesetzt. Die Impulsfolgen werden mit oder ohne Abkühlung der MO-Varistoren zwischen den Impulsen und unter Umständen mit Polaritätswechseln zwischen den Impulsen durchgeführt. Mangelbehaftete MO-Varistoren sollen während der Prüfung z. B. durch mechanisches Zerbrechen infolge des Energieeintrags ausfallen. Nach bestandener Prüfung werden die MO-Varistoren verpackt und eingelagert, wobei die Luftfeuchtigkeit zumeist kontrolliert/reduziert wird (g).

Die durch den Sinterprozess entstandene Mikrostruktur eines MO-Varistors ist in *Abbildung 2.5* dargestellt. Die Aufnahme entstand durch ein Rasterelektronenmikroskop und zeigt eine Bruchstelle eines kommerziellen MO-Varistors der Hochspannungsebene, wie er in *Kapitel 5* verwendet wird. Da ein Bruch des Materials aufgrund der mechanischen Festigkeit vorzugsweise entlang der Korngrenze verläuft (siehe [Den98]) sind in der Darstellung die verhältnismäßig großen ZnO-Körner und die hell dargestellten Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Tripelpunkte (vgl. z. B. [Gre86] und [Stu87]) zu sehen. Die bismutreiche Grenzschicht<sup>16</sup> zwischen den ZnO-Körnern ist verantwortlich für den Varistoreffekt (z. B. in [Gre90] sehr ausführlich dargestellt), wie er im Weiteren beschrieben wird. In den Tripelpunkten sind sogenannte Spinel-Phasen zu finden (z. B. in [Cig13a] beschrieben). Weiterhin enthält der dargestellte MO-Varistor offensichtlich Luft einschüsse, wie sie auch in [Cig13a] beschrieben werden.

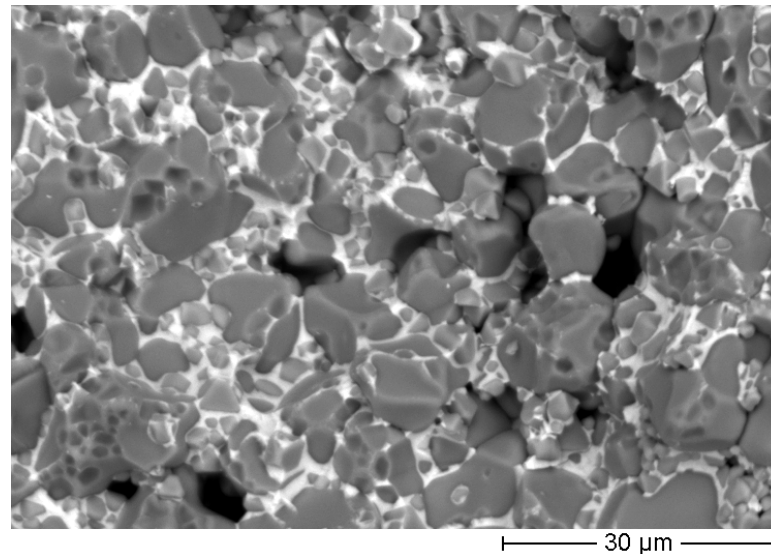
Jede Grenzschicht<sup>17</sup> zwischen zwei ZnO-Körnern hat je nach Aufbau (siehe z. B. [Ols89a] und [Ols89b]) eine Durchbruchspannung von 3,2 V bzw. 3,6 V. Um für eine gegebene Anwendung die gewünschte Durchbruchspannung für den gesamten Varistor zu erhalten, müssen MO-Varistoren mit entsprechend vielen seriellen Kornübergängen gefertigt werden. Aus produktions- und prüftechnischen Gründen ist die MO-Varistorhöhe herstellerübergreifend auf einen Wert von etwa 45 mm begrenzt. In Überspannungsableitern für hochspannungstechnische Anwendungen werden deshalb viele einzelne MO-Varistoren über-

<sup>14</sup> Bestimmte Prüfungen werden herstellerübergreifend wegen ihrer negativen Auswirkungen auf den MO-Varistor oder wegen des hohen Aufwandes nur an einzelnen MO-Varistoren eines Produktionsloses durchgeführt. Hierzu zählt beispielsweise die zeitraffende Alterungsprüfung nach [IEC60099-4].

<sup>15</sup> Die AC-Referenzspannung ist in der [IEC60099-4] definiert.

<sup>16</sup> Die nur 1 nm bis 2 nm dick ist, und deshalb in dieser Auflösung nicht zu erkennen ist.

<sup>17</sup> Es sei darauf hingewiesen, dass nicht alle Korngrenzen in einem MO-Varistor aktiv sind, bzw. ein Varistorverhalten aufweisen (siehe z. B. [Sch94]).



**Abbildung 2.5:** Rasterelektronenmikroskopaufnahme einer Bruchfläche eines in *Kapitel 5* beschriebenen MO-Varistors bei etwa 1000facher Vergrößerung der Aufnahme

einander gestapelt (siehe *Kapitel 2.1*). Um das gewünschte Energieaufnahmevermögen oder eine bestimmte Restspannung bei eingepprägtem Strom zu erzielen, müssen dem Stromfluss entsprechend viele parallele Pfade durch den MO-Varistor geboten werden, was durch die Wahl des Durchmessers der MO-Varistoren erreicht wird. Aus fertigungstechnischen Gründen ist der MO-Varistordurchmesser herstellerübergreifend auf etwa 110 mm begrenzt. Wird ein höheres Energieaufnahmevermögen benötigt, werden mehrere MO-Varistorsäulen (innerhalb eines oder in mehreren Überspannungsableitergehäusen) parallel betrieben.

Es wird häufig davon ausgegangen, dass bei gleich gefertigten MO-Varistoren unterschiedlicher geometrischer Dimensionen die gleiche  $EJ$ -Kennlinie als elektrische Charakteristik zugrunde liegt. Hierbei wird die  $EJ$ -Kennlinie aus einer gemessenen  $UI$ -Kennlinie dividiert durch die geometrischen Dimensionen bestimmt. Da der Stromfluss im MO-Varistor nicht in allen Bereichen der  $UI$ -Kennlinie homogen verteilt ist (siehe [Bar96b]), ist zu beachten, dass sich die örtliche Stromdichte je nach Kennlinienbereich vom Mittelwert über dem gesamten MO-Varistor unterscheidet. Ferner differiert die Korngrößenverteilungen bei unterschiedlichen MO-Varistordurchmessern aus Fertigungsgründen, was die Skalierbarkeit ausgehend von einer ermittelten  $EJ$ -Kennlinie einschränkt.

Der Aufbau der Grenzschicht wird, wie schon beschrieben, durch die Materialzusammensetzung<sup>18</sup> und den Sinterprozess bestimmt. Während des Sintervorganges wachsen durch

<sup>18</sup> Wie bereits dargestellt, wird davon ausgegangen, dass der betrachtete MO-Varistor hauptsächlich aus den heute üblichen Additiven  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Sb}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CoO}$  und  $\text{MnO}$  besteht, wobei der Hauptbestandteil  $\text{ZnO}$  etwa 90 % des Gesamtgewichts ausmacht (siehe [Cig13a]).

Diffusionsvorgänge ZnO-Körner, die von einer bismutreichen flüssigen Phase umschlossen<sup>19</sup> werden. Aufgrund der äußeren Form der ZnO-Körner ist die Ausdehnung der Grenzschicht nicht konstant, wie [Eda89] darstellt und auch in Abbildung 2.5 zu erkennen ist. In den Zwickeln zwischen den Körnern lagern sich Spinell- und Pyrochlorphasen an, die nach [Sch94] nicht zum elektrischen Verhalten des MO-Varistors beitragen und deshalb hier nicht weiter betrachtet werden sollen. Bi ist nicht direkt für den Varistoreffekt verantwortlich, ohne Bi-Dotierung, oder Dotierung mit einem gleichwertigen Additiv, entsteht jedoch auch kein Varistoreffekt [Gre90]. Das  $\text{Bi}^{3+}$  aktiviert die Korngrenze, da dessen Defektzustände Elektronen<sup>20</sup> einfangen können. Befindet sich  $\text{Bi}^{3+}$  zwischen zwei ZnO-Körnern, wandern Elektronen von den ZnO-Körnern in die Grenzschicht, bis das thermodynamische Gleichgewicht erreicht ist [Cla99]. Die abfließenden Elektronen lassen einen Bereich mit ionisierten Störstellen zurück<sup>21</sup>, der „Verarmungszone“ genannt wird und eine Dicke im Bereich von  $\approx 100$  nm hat ([Ein79] schätzt die Dicke mit 34 nm pro ZnO-Korn ab, dagegen gibt beispielsweise [Cig13a] eine Gesamtbreite von  $\approx 200$  nm an). Die auf diese Weise entstehende Doppel-Schottky-Barriere verhindert einen Stromfluss und ist in *Abbildung 2.6* dargestellt (siehe z. B. [Cla99]).

Zu den Leitungsmechanismen existieren für die verschiedenen Strombereiche unterschiedliche Modelle. Einen Überblick darüber bietet beispielsweise [Eda89]. Hier sollen im Folgenden nur die grundlegenden Modelle dargestellt werden: In Abbildung 2.6(a) sind auf beiden Seiten der Korngrenze die Energieniveaus der Körner dargestellt. Da ZnO einen Überschuss<sup>22</sup> an  $\text{Zn}^{2+}$  (bzw.  $\text{O}^{2-}$ -Leerstellen) besitzt, hat es die Eigenschaften eines n-Halbleiters, und Elektronen sind die Majoritätsladungsträger (siehe z. B. [Kle04] und [Cig13a]). Das Fermi-Niveau  $E_F$  liegt im Korn nur wenig unterhalb der Leitungsbandkante  $E_C$ . Die  $\text{Bi}^{3+}$ -haltige Korngrenze ist ein p-Halbleiter und kann Elektronen einfangen, weshalb das Fermi-Niveau  $E_F$  in der Korngrenze nur wenig oberhalb der Valenzbandkante  $E_V$  liegt (siehe [Gre90] und [Cla99]).

Abbildung 2.6(b) stellt das Bänderdiagramm nach der „Rekombination“ der Elektronen an der Korngrenze dar. Das Fermi-Niveau  $E_F$  ist über den gesamten Bereich ausgeglichen,

<sup>19</sup> Nach [Gre90] ist die notwendige Menge an Bi, um den Varistoreffekt in einem MO-Varistor zu erzeugen, nur geringfügig größer, als notwendig wäre, um alle ZnO-Körner mit einer Atomlage  $\text{Bi}^{3+}$  zu umschließen. [Kle04] nennt die Größe der  $\text{Bi}^{3+}$ -Ionen als vermuteten Grund, warum diese nicht in das ZnO-Gitter eingebaut werden.

<sup>20</sup> Nach Untersuchungen von [Stu87] werden die Defekte durch  $\text{O}^{2-}$  kompensiert bzw. überkompensiert [Sch94].

<sup>21</sup> Der Vollständigkeit halber sei darauf hingewiesen, dass die Höhe der Potentialbarriere auch von der Leitfähigkeit des Korns abhängig ist, wie [Cla99] veranschaulicht. Er führt aus, dass bei zu großer Leitfähigkeit die Barrierenhöhe herabgesetzt wird und bei zu kleiner Leitfähigkeit letztere nicht existiert. Somit existiert ein Optimum der Leitfähigkeit.

<sup>22</sup> Der Überschuss kann nach [Kle04] durch andere Dotierstoffe (tiefe Donatoren), die sich gut in das ZnO-Gitter einbauen lassen, noch verstärkt werden.

die negative Ladung  $n_t$  hat sich in die Korngrenze verlagert. Die symmetrische<sup>23</sup>, positive Raumladungszone der Breite  $2 \cdot d$  bildet eine Potentialbarriere der Höhe  $\Phi_B$ , die z. B. von thermisch aktivierten Elektronen oder durch den „Tunneleffekt“ überwunden werden kann (die Wahrscheinlichkeit ist jedoch bei Umgebungstemperatur sehr gering) [Gup90].

Wird an die Grenzschicht eine Spannung  $U$  angelegt (in *Abbildung 2.7* mit „V“ bezeichnet), werden die Bänder entsprechend gebogen. Das Ergebnis zeigt *Abbildung 2.7*. Das Leitungsband, das Fermi-Niveau und das Valenzband verschieben sich entsprechend der angelegten Spannung. Elektronen höheren Energieniveaus können die Korngrenze passieren, bei kleinen angelegten Spannungen bleibt die Potentialbarriere bestehen<sup>24</sup>, wodurch es zu dem Fluss eines nur geringen Leckstromes kommt [Cig13a].

Um das Verhalten des MO-Varistors im stark nichtlinearen Bereich für  $\alpha > 20$  zu erläutern, benötigt es einen weiteren Effekt, den des „heißen Elektrons“ (siehe [Pik81], [Bla86] und [Gre90]), der mit *Abbildung 2.7(b)* veranschaulicht wird. Bei angelegten Spannungen oberhalb der Durchbruchsspannung können thermisch angeregte Elektronen im elektrischen Feld so stark beschleunigt werden, dass deren kinetische Energie ausreicht, um durch Stoßionisation Minoritätsladungsträger zu erzeugen (siehe [Pik81], [Bla86]). Diese Elektronen werden „heiße Elektronen“ genannt. Die ausgeschlagenen Elektronen fließen ab, wohingegen die Löcher zur Korngrenze wandern<sup>25</sup>, was durch den sehr guten Sauerstoffleiter  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  unterstützt wird (siehe z. B. [Den98]). An der Korngrenze angelangt, rekombinieren diese mit den dortigen gefangenen Elektronen, was die Barrierenhöhe herabsetzt. Dieses führt zu einer größer werdenden Anzahl an „heißen Elektronen“, da nun thermisch angeregte Elektronen geringerer Energie die Potentialbarriere ebenfalls überwinden können, wodurch ein lawinenartiger Abbau der Potentialbarriere<sup>26</sup> stattfindet [Cig13a].

Mit steigender Stromdichte, bezogen auf die gesamten MO-Varistorfläche, steigt die Spannung über dem MO-Varistor zunächst langsam an. Hierdurch werden stetig mehr parallele Pfade mit leicht höherer Durchbruchspannung genutzt [Gup90]. Bei sehr hohen Stromdichten nimmt die Nichtlinearität  $\alpha$  deutlich ab (wie bereits beschrieben), da mit steigender Stromdichte immer mehr Potentialbarrieren abgebaut sind und immer stärker die begrenzte Leitfähigkeit der Körner den Stromfluss beeinflusst [Gup90].

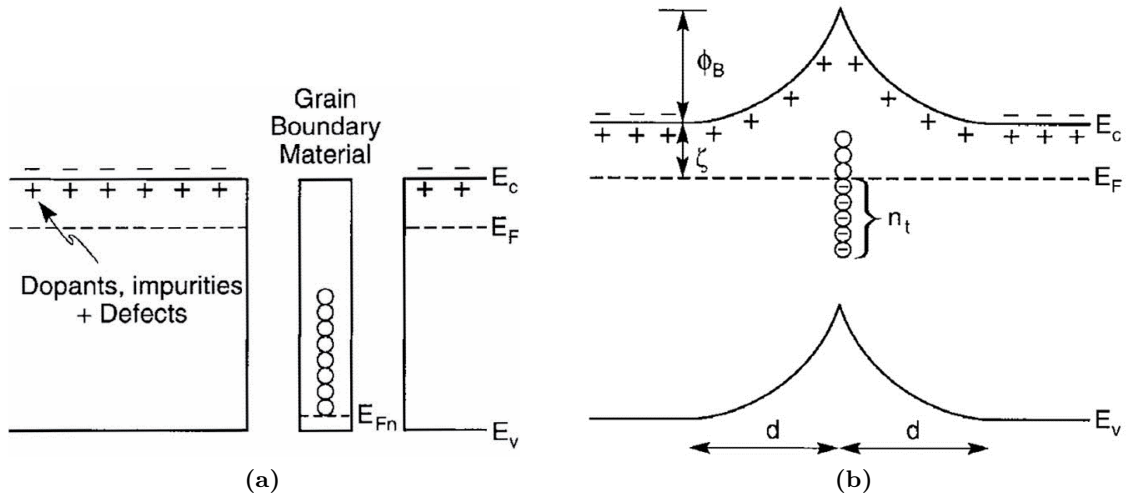
Warum bei hohen Stromdichten und hohen Stromsteilheiten ein „induktives“ Verhalten bei MO-Varistoren beobachtet werden kann (unter Berücksichtigung, dass die längenab-

<sup>23</sup> Die Symmetrie bildet die Grundlage dafür, dass das Varistorverhalten polaritätsunabhängig ist [Gup90].

<sup>24</sup> Hierfür ist das Einfangen von Elektronen in anfänglich unbesetzten Grenzflächenzuständen (das sogenannte „pinning“) verantwortlich [Cig13a].

<sup>25</sup> Nach [Cig13a] benötigen sie dafür weniger als 1 ns, [Ein82] spricht von „einigen Nanosekunden“.

<sup>26</sup> Dieser Effekt unterscheidet den MO-Varistor von der Zenerdiode [Cla99].

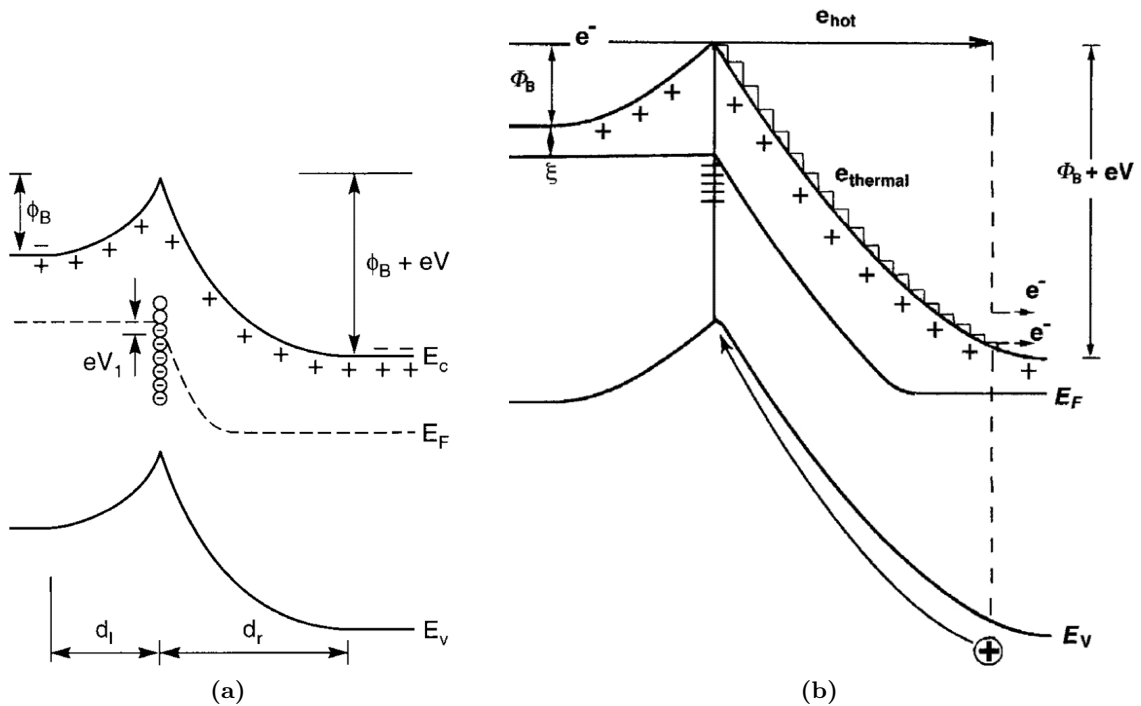


**Abbildung 2.6:** Bänderdiagramme für die Korngrenzbereiche (nach [Cla99] ©1999 AIP, siehe auch [Pik81] und [Gre90]), (a) vor und (b) nach dem Ladungsausgleich (Benennung der Formelzeichen siehe *Tabelle 2.2*)

**Tabelle 2.2:** Benennung der Formelzeichen in Abbildung 2.6 (siehe auch [Hal12])

Formelzeichen	Beschreibung
$d$	Breite der Potentialbarriere im spannungslosen Zustand (in m)
$E_C$	Leitungsband (in eV)
$E_F$	Fermi-Niveau (in eV)
$E_{Fn}$	Fermi-Niveau der Grenzsicht (in eV)
$E_V$	Valenzband (in eV)
$n_t$	Dichte der gebundenen Ladungsträger/Grenzflächenladung
$\zeta$	Abstand des Leitungsbandes zum Fermi-Niveau im spannungslosen Zustand (in eV)
$\Phi_B$	Höhe der Potentialbarriere (in eV)





**Abbildung 2.7:** Bänderdiagramme für die Korngrenzbereiche bei angelegter Spannung (nach [Cla99] ©1999 AIP, siehe auch [Pik81] und [Gre90]), (a) Effekt der angelegten Spannung auf die Bandstruktur und (b) Abbau der Potentialbarriere durch „heiße Elektronen“ (Benennung der Formelzeichen siehe *Tabelle 2.3*)

**Tabelle 2.3:** Benennung der Formelzeichen in Abbildung 2.7 in Ergänzung zu Tabelle 2.2 (siehe auch [Hal12])

Formelzeichen	Beschreibung
$d_l$	Breite der Potentialbarriere links von der Korngrenze bei angelegter Spannung „eV“ (in m)
$d_r$	Breite der Potentialbarriere rechts von der Korngrenze bei angelegter Spannung „eV“ (in m)
$e$	Elementarladung eines Elektrons
$e^-$	Abkürzung für Elektron mit der Elementarladung $e$
$e_{hot}$	Elektron, das über genügend Energie verfügt um durch Stoßionisation Minoritätsladungsträger freizusetzen
$e_{thermal}$	Elektron, dessen Energie durch Aussendung von Phononen abgebaut wird
$eV$	Beschleunigungsenergie für Elektronen bei Spannung „V“
$V$	angelegte Spannung von rechts nach links

hängige Induktivität des MO-Varistors, wie z. B. in [Rei08] dargestellt, kompensiert wird) wird unterschiedlich begründet. Während [Eda89] dies mit der Durchschaltzeit von  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  begründet, weist [Bla86] rechnerisch nach, dass dies durch den bei Überschreiten der Durchbruchspannung von Elektronen-Leitung auf Löcher-Rekombination wechselnden Leitungsmechanismus erklärt werden kann (siehe auch [Sch94]). Dieses Verhalten wird in erster Näherung häufig durch die in Abbildung 2.3 dargestellte Induktivität  $L_b$  berücksichtigt (siehe auch [Cig13a]).

Abschließend soll die Temperaturabhängigkeit der  $UI$ -Kennlinie nicht unerwähnt bleiben. Im Vordurchbruchbereich ergibt sich durch den Leitungsmechanismus ein Warmleiterverhalten (siehe z. B. [Eda84]), weil bei höheren Temperaturen mehr Elektronen die Potentialbarriere passieren können. Im Vergleich zu diesem Effekt ist die Temperaturänderung im Hochstrombereich nur sehr schwach ausgeprägt [Sch94]. In diesem Bereich bestimmt (wie oben beschrieben) hauptsächlich die metallische Leitfähigkeit des Korns das Verhalten, weshalb hier ein Kaltleiterverhalten vorliegt, was z. B. in [Had05] und [FH03] dargestellt wird.

Von dieser mikroskopischen Betrachtung im Innern des MO-Varistors ausgehend, lässt sich nun das makroskopische Verhalten von MO-Varistoren besser deuten.

### 2.3 Arten des Energieaufnahmevermögens

Überspannungsableiter sollen Überspannungen begrenzen<sup>27</sup> und so die Spannungsbelastung von Betriebsmitteln reduzieren, wodurch letztere kostengünstiger ausgeführt werden können. Wie in Kapitel 1 beschrieben, treten Überspannungen beispielsweise durch Schalthandlungen bzw. Fehler in Versorgungsnetzen oder durch Blitzentladungen auf. Durch den Ableitvorgang wird (in Verbindung mit der bauartbedingt abfallenden Spannung<sup>28</sup>) in dem MO-Varistoren elektrische Energie in Wärme gewandelt. Diese Wärme sowie die auftretenden Kräfte (z. B. infolge der Erwärmung) können die MO-Varistoren schädigen, außerdem kann der Stromfluss reversible oder irreversible Änderungen in den MO-Varistoren hervorrufen, die den Weiterbetrieb beeinträchtigen können. Das Energieaufnahmevermögen eines Überspannungsableiters gilt als erreicht, wenn die eingebrachte Energie durch Primär- oder

<sup>27</sup> Die gebräuchliche Bezeichnung „Überspannungsableiter“ suggeriert, dass das Betriebsmittel Überspannungen weggleiten würde. Genaugenommen führen Überspannungsableiter in Hochspannungsnetzen (z. B. infolge von Blitzentladungen) Ladung gegen Erde ab und sorgen so dafür, dass nur geringe Überspannungen an den zu schützenden Betriebsmitteln (z. B. Transformatoren) entstehen können. Somit verhindern sie (bei angenommenen eingepprägten Strömen) die Entstehung von Überspannungen.

<sup>28</sup> Da die  $UI$ -Kennlinie, wie bereits beschrieben, bauartbedingt ist (sie unterscheidet sich bei MO-Varistoren unterschiedlicher Hersteller), ist die am MO-Varistor abfallende Spannung bei einem eingepprägten Strom ebenfalls bauartbedingt. Folgerichtig ist die von einem MO-Varistor aufzunehmende Energie bei einem eingepprägten Strom auch bauartbedingt.

Sekundäreffekte den Überspannungsableiter bzw. dessen MO-Varistoren derart geschädigt hat, dass ein weiterer Betrieb nicht möglich ist. In dieser Arbeit wird daher zwischen dem thermischen und dem Impulsenergieaufnahmevermögen unterschieden, wobei in dieser Arbeit hauptsächlich das Impulsenergieaufnahmevermögen betrachtet wird.

### 2.3.1 Thermisches Energieaufnahmevermögen

Das thermische Energieaufnahmevermögen wird durch die Temperatur begrenzt, die die MO-Varistoren im Überspannungsableiter annehmen können, ohne dass die gestiegene elektrische Verlustleistung (bei anliegender Betriebsspannung) die abführbare thermische Leistung übersteigt (wie z. B. in [Cig13a] und [Kle04] beschrieben). Da die *UI*-Kennlinie eines MO-Varistors im Vordurchbruchbereich stark temperaturabhängig ist und Wärmeleitereigenschaften<sup>29</sup> hat, fließt nach einer Erwärmung durch einen Energieeintrag durch den MO-Varistor ein höherer Leckstrom bei anliegender Betriebsspannung als vor dem Energieeintrag. Ist der Energieeintrag so hoch, dass die durch ihn eingebrachte Energie die Temperatur der MO-Varistoren so stark ansteigen lässt, dass die elektrische Verlustleistung bei anliegender Betriebsspannung höher ist als die abführbare Wärmeleistung, steigt durch die negative Rückkopplung die Temperatur der MO-Varistoren immer weiter an, bis diese mechanisch zerstört werden („thermisches Weglaufen“) [ABB11]. Für die abführbare Wärmeleistung ist das Design des Überspannungsableiters, speziell sein transientes Wärmeabgabevermögen, von entscheidender Bedeutung. Weiterhin spielt für die thermische Stabilität die Betriebsspannung und die Temperaturcharakteristik der *UI*-Kennlinie der MO-Varistoren eine entscheidende Rolle. Da die *UI*-Kennlinie durch einen Energieeintrag negativ beeinflusst werden kann (siehe [Hei01] und [Kle04]), kann die Art des Energieeintrags (die Vorgeschichte) ebenfalls für die thermische Stabilität des Überspannungsableiters entscheidend sein. Die Temperatur der MO-Varistoren nach einem Energieeintrag definierter Höhe lässt sich durch konstruktive Maßnahmen steuern. Hierzu zählt das Volumen der MO-Varistoren, aber auch Wärmesenken im Überspannungsableiter, wie metallische Füllstücke [Hin11]. Das Wärmeabgabeverhalten (und damit die zuführbare elektrische Leistung ohne thermische Instabilität) lässt sich ebenfalls durch die Konstruktion des Überspannungsableiters beeinflussen (siehe [Cig13a]). Das thermische Energieaufnahmevermögen ist das Auslegungskriterium für Überspannungsableiter in Standardanwendungen und wird durch die sogenannte Arbeitsprüfung (z. B. in [IEC60099-4]) nachgewiesen.

<sup>29</sup> Die *UI*-Kennlinie verschiebt sich im Vordurchbruchbereich bei höheren Temperaturen nach rechts, hin zu höheren Strömen bei gleicher anliegender Spannung.

### 2.3.2 Impulsenergieaufnahmevermögen

Das Impulsenergieaufnahmevermögen beschreibt die Energie, die durch einen Impulsenergieeintrag eingebracht werden kann, ohne den MO-Varistor zu schädigen. In vielen Veröffentlichungen zu diesem Thema (wie z. B. [Bar99] und [Rin97]) werden ausschließlich verschiedene Arten der mechanischen Schädigungen des MO-Varistors betrachtet. Änderungen der *UI*-Kennlinie des MO-Varistors, die durch Impulsbelastungen ausgelöst den weiteren Betrieb (und wie beschrieben die thermische Stabilität) beeinflussen, stellen ein weiteres Schädigungsmerkmal dar (siehe z. B. [Kle04] und [Rei08]). Allen Merkmalen gemein ist, dass diese hauptsächlich von den MO-Varistoren und nur untergeordnet von der Konstruktion<sup>30</sup> des Überspannungsableiters abhängig sind. Die unterschiedlichen Schädigungsmerkmale werden durch wiederholte Belastungen unter Umständen verstärkt, weshalb in dieser Arbeit zwischen Einzel- und Mehrfachimpulsbeanspruchungen unterschieden wird, wobei letztere wiederum in multiple und repetierende Belastungen unterteilt werden.

#### Einzelimpulsbelastbarkeit

Die Einzelimpulsbelastbarkeit bezeichnet die Belastbarkeit durch einen einzigen<sup>31</sup> Energieeintrag. Sie ist abhängig von der Dauer und der Stromdichte des Energieeintrags (siehe z. B. [Rin97] und [Cig13a]) und wird im Kapitel 5.1 genauer betrachtet. Da in der Praxis auftretende Energieeinträge sehr kurze Impulsdauern und hohe Stromamplituden aufweisen können (siehe [Cig13b]), führt der Energieeintrag zu einer schlagartigen Erwärmung. Diese in Verbindung mit fertigungsbedingten Inhomogenitäten (siehe [Hin11]) sowie ungleichmäßigen Stromaufteilungen (siehe z. B. [Bar96b]) führen zu thermomechanischen Spannungen im MO-Varistor, die zum Zerschlagen desselben führen können (siehe [Kle04]). Bei längeren Energieeinträgen wird das Aufschmelzen eines einzelnen Strompfades beobachtet, der dann bis zu einem Durchschlag führt (siehe [Cig13a]). Dieses Schadensbild zeigt sich auch nach einem „thermischen Weglaufen“ eines MO-Varistors. Die Typprüfungen des Impulsenergieaufnahmevermögens in [IEC60099-4] bzw. [IEC-37/416/FDIS] und [IEEEC62.11-2012] stellen

<sup>30</sup> Abgesehen von Überschlagsphänomenen über die Glasur des MO-Varistors, die durch die Konstruktion beeinflusst werden können. Weiterhin kann ein zu geringer Anpressdruck der Kontaktelektroden das Energieaufnahmevermögen beeinflussen [Rei08].

<sup>31</sup> Es sei darauf hingewiesen, dass ein Wechselstromenergieeintrag mit betriebsfrequenter Wechselspannung durch seine Form nicht eindeutig einer Einzel- oder Mehrfachbelastung zuzuordnen ist. Strenggenommen handelt es sich um eine Mehrfachbelastung mit alternierender Polarität. Da jedoch im Stromfluss nur energetische Totzeiten im Bereich von Millisekunden auftreten, wird im Folgenden ein Wechselstromenergieeintrag als Ganzes den Einzelimpulsen zugeordnet (die gleiche Benennung erleichtert weiterhin den Vergleich zu früheren Veröffentlichungen, wie z. B. [Rin97], [Rei08], [Cig13a] usw.).

eine Mischform aus Mehrfachimpulsbelastbarkeit und Belastbarkeit gegen repetierende Impulse dar, wie in Kapitel 6.2 diskutiert.

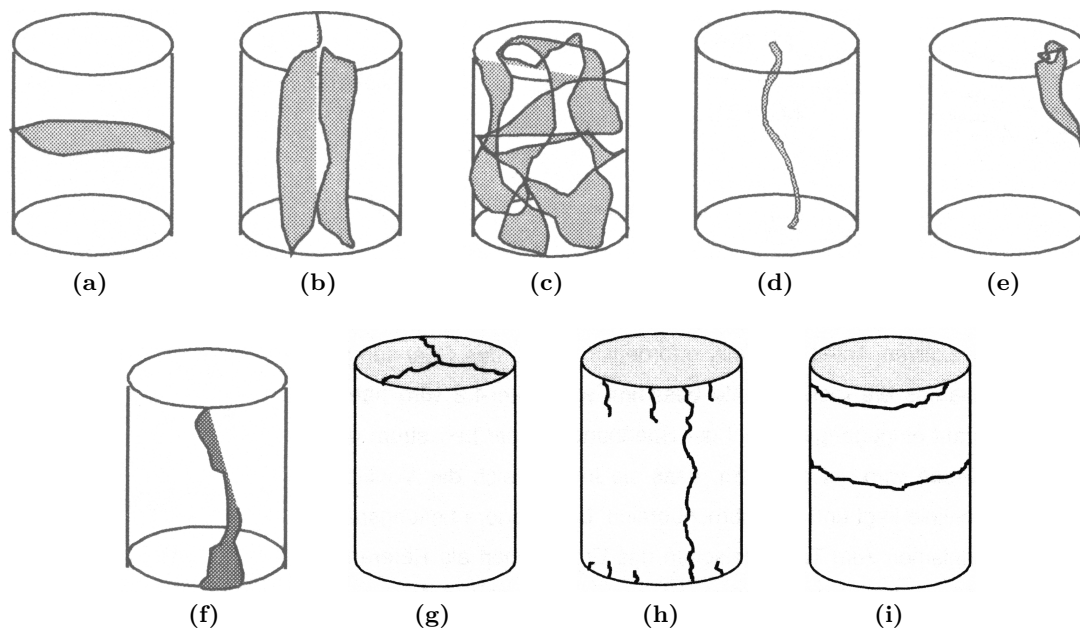
### **Mehrfachimpulsbelastbarkeit**

Die Mehrfachimpulsbelastbarkeit erweitert die Belastungsform auf mehrere aufeinanderfolgende (sogenannte multiple) Impulsbelastungen, wobei der Zeitraum zwischen den Energieeinträgen so kurz ist, dass keine nennenswerte Energie vom MO-Varistor abgegeben werden kann. Hierdurch können Ermüdungserscheinungen durch die erhöhte Anzahl an Impulsen auftreten. Aufgrund der hohen thermischen Leitfähigkeit des MO-Varistors (siehe z. B. [Lat83]) kann es jedoch auch zu thermischen Ausgleichsvorgängen im Volumen kommen, die das Energieaufnahmevermögen begünstigen. Aufgrund der kurzen Zeit zwischen den Energieeinträgen steigt die Temperatur im MO-Varistor bzw. in den aktiven Strompfaden von Impuls zu Impuls an. Aus diesem Grund sind die Wirkungsmechanismen, die zum Ausfall führen, bei sehr kurzen Abständen zwischen den Energieeinträgen denen des Einzelimpulses vergleichbar. Kapitel 5.3 stellt neue Ergebnisse zur Doppelimpulsbelastbarkeit mit Rechteckimpulsenergieeinträgen vor.

### **Belastbarkeit gegen repetierende Impulse**

Die Belastbarkeit bei repetierenden Impulsen soll das Vermögen des MO-Varistors beschreiben, wiederholt Belastungen zu widerstehen, wobei zwischen den Belastungen die Zeitdauer so lang gewählt wird, dass der belastete MO-Varistor bis auf Umgebungstemperatur abkühlen kann. Aus diesem Grund ist die Summenenergie aus den einzelnen Belastungen nicht von Relevanz, sondern alleine die Anzahl der repetierenden Belastungen mit einem bestimmten Energieniveau. Diese Art der Belastung kann zu Ermüdungserscheinungen im MO-Varistor führen, wobei nicht nur die Energieeinträge, sondern unter Umständen auch der Abkühlprozess die Ermüdung beeinflussen kann<sup>32</sup>. Hierbei sind auch die Veränderungen der *UI*-Kennlinie des MO-Varistors zu berücksichtigen, da sich reversible Änderungen durch wiederholte Belastungen verstärken können. In Kapitel 5.4 werden neue Untersuchungen mit repetierenden Belastungen vorgestellt.

<sup>32</sup> Sehr schnelles Abkühlen kann zu thermischen Spannungen führen, die den MO-Varistor mechanisch schädigen können. Sehr langsames Abkühlen hingegen kann durch das lange Verharren auf hoher Temperatur (ähnlich dem „Tempern“, bzw. Nachsintern) einen positiven Effekt auf die Ladungsverteilung im MO-Varistor haben [Gre90].



**Abbildung 2.8:** Charakteristische Schadensbilder von MO-Varistoren infolge von Energetischen- und Impulsbelastungen [Kle04] ©2004 Shaker Verlag

## 2.4 Mechanische Schädigungen

Unterschiedliche Belastungsarten können unterschiedliche Veränderungen im MO-Varistor hervorrufen. Änderungen der Mikrostruktur (siehe z. B. [Stu90]), die zu Kennlinienänderungen führen, sind eine davon. Außerdem können (wie angesprochen) durch hohe Energieeinträge mechanische Spannungen im MO-Varistor auftreten, die zum Zerbrechen führen können, bzw. bei thermischer Überlastung einzelner Strompfade können diese aufschmelzen. Weiterhin kann durch thermische Schocks nicht nur die Varistorkeramik, sondern auch die Glasur Schaden nehmen und reißen, was im Nachfolgenden die Überschlagswahrscheinlichkeit deutlich erhöht (siehe [Kle04]). Einen Überblick über charakteristische mechanische Ausfallerscheinungsformen sowie Rissbildungen zeigt *Abbildung 2.8*.

Mechanische Spannungen können zum Bruch der Varistorkeramik oder der Glasur führen, was je nach Ursache zu den Ausfallbildern in *Abbildung 2.8* (a)–(c) und (g)–(i) führen kann. Wird ein Strompfad zu stark thermisch beansprucht, so dass die Schmelztemperatur und im weiteren Verlauf die Siedetemperatur erreicht wird, kann ein Schmelzkanal durch einen Teil des MO-Varistors, wie in *Abbildung 2.8* (e) gezeigt, oder den gesamten MO-Varistor wie in *Abbildung 2.8* (d) entstehen. Tritt der Schmelzkanal exzentrisch auf, führt der entstehende Gasdruck in experimentellen Versuchen häufig zum Aufbrechen der

Keramik, was zu Schadensbildern wie in Abbildung 2.8 (b) führen kann. Ist die dielektrische Beanspruchung über dem MO-Varistor so hoch, dass ein Überschlag stattfindet, tritt das Schadensbild aus Abbildung 2.8 (f) auf, wobei unter Umständen durch leitfähige Ablagerungen der Weiterbetrieb gefährdet ist (siehe [Kle04]). Außerdem kann durch die punktuelle Wärmeeinwirkung die Glasur reißen, was zum Schadensbild Abbildung 2.8 (h) führen kann.

## 2.5 Stand des Wissens zum Einzel- und Mehrfachimpulsenergieaufnahmevermögen

Im Folgenden wird ein Überblick über den Stand des Wissens zum Einzel- und Mehrfachimpulsenergieaufnahmevermögen von MO-Varistoren gegeben. Die Anzahl von unabhängigen Forschungsergebnissen ist jedoch im Vergleich zu anderen Forschungsgebieten gering, da für die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen spezielle, kostenintensive Versuchseinrichtungen für die Erzeugung von relevanten Energieeinträgen notwendig sind. Im Nachfolgenden werden hauptsächlich experimentelle und simulative Untersuchungen vorgestellt, die an MO-Varistoren für Mittel- und Hochspannungsanwendungen durchgeführt wurden. Untersuchungen an MO-Varistoren des Niederspannungsbereiches sind nur mit Einschränkungen auf MO-Varistoren der Mittel- und Hochspannungstechnik übertragbar, da der mechanische Aufbau sich sowohl makroskopisch als auch mikroskopisch deutlich unterscheidet. Die Unterschiede in der Korngröße, das Verhältnis von Außendurchmesser zu Höhe des MO-Varistors, die makroskopische Kontaktierung und das Volumen (um nur einige Beispiele zu nennen) beeinflussen das Energieaufnahmevermögen, wie z. B. in [Eda84] und [Bar01] beschrieben wird.

In der Veröffentlichung von [Hie74] wird die Belastbarkeit der ersten MO-Varistoren dargestellt und zu diesem Zweck auch auf das Energieaufnahmevermögen eingegangen. Die beschriebenen MO-Varistoren (mit einem Durchmesser von 56 mm) werden zum einen mit einer Folge von 20 Rechteckimpulsen mit einer Scheiteldauer von 2 ms bzw. zwei Hochstoßstromimpulsen der Form  $4/10\text{ }\mu\text{s}$  mit Stromscheitelwerten von 150 kA bzw. 100 kA belastet. Während der repetierenden Belastungen beobachtet er Kennlinienveränderungen, die in dem in *Abbildung 2.9* gezeigten Diagramm dargestellt werden. Es ist zu erkennen, dass mit zunehmender Impulsanzahl die *UI*-Kennlinie im Vordurchbruchbereich (gemessen bei einem eingepprägten Gleichstrom von 1 mA mit gleicher bzw. entgegengesetzter Polarität zum Impulsenergieeintrag) immer stärker verändert wird. Die Belastungsanzahl mit bis zu 100 Belastungen mit einem Stromscheitelwert von 40 kA bei Hochstoßstrom der Form  $4/10\text{ }\mu\text{s}$

bzw. 1000 Belastungen bei Rechteckimpulsen mit einer Scheiteldauer von 2 ms mit Stromscheitelwerten von 400 A bzw. 600 A ist im Vergleich zu den weiteren Veröffentlichungen sehr hoch. Es bleibt kritisch anzumerken, dass keine Aussagen zu Ausfallwahrscheinlichkeiten bei den verschiedenen Belastungen getroffen werden, sondern die Betrachtungen lediglich auf die Kennlinienveränderung (möglicherweise eines einzigen MO-Varistors) beschränkt sind. Dies ist vermutlich dem damals noch frühen Entwicklungsstadium des MO-Varistors geschuldet.

Fast zehn Jahre später untersucht [Kan83] systematisch experimentell die Einflussfaktoren auf das Energieaufnahmevermögen. Er belastet 10 bis 20 MO-Varistoren (mit einem Durchmesser von etwa 100 mm) in gleicher Art und Weise und variiert die Impulslänge (Doppelexponentialstoßströme mit etwa 3 ms bis 40 ms Länge), Starttemperatur (etwa 50 °C bis 200 °C), Impulsanzahl bei einem Rechteckimpuls mit einer Scheiteldauer von 2 ms (Einzelimpuls- im Vergleich zu multiplen und repetierenden Belastungen) sowie die Länge von Wechselstromenergieeinträgen (Dauer des Energieeintrags etwa 0,1 s bis < 100 s). Es ist zu beachten, dass [Kan83] im Gegensatz zu späteren Veröffentlichungen anderer Autoren keinen Unterschied im Energieaufnahmevermögen bei unterschiedlichen Belastungsarten und Belastungsdauern (es wurden jeweils drei Impulse in einem Zeitintervall von 2 min erzeugt) feststellt. Auch bei Belastung mit Wechselstromenergieeinträgen fallen die MO-Varistoren über einen weiten Bereich der Dauer des Energieeintrags bei der gleichen Ausfallenergie wie bei den Impulsbelastungen aus. Nach seiner Aussage ist die *UI*-Kennlinienveränderung im Vordurchbruchbereich durch Impuls- oder Wechselstrombelastungen vernachlässigbar mit Ausnahme von Hochstoßströmen der Form  $4/10 \mu\text{s}$ , bei denen sich bei hohen Stromdichten Änderungen ergeben. Bei der Belastung von vorgewärmten MO-Varistoren stellt er eine Abnahme des Energieaufnahmevermögens mit steigender Starttemperatur fest<sup>33</sup>, jedoch erst ab einer Starttemperatur von etwa 100 °C. Die Unterschiede des Energieaufnahmevermögens bei Belastungen, die ohne Zwischenkühlung aufeinanderfolgen<sup>34</sup>, und mit Zwischenkühlung<sup>35</sup>, sind in *Abbildung 2.10* dargestellt. Es ist ein Unterschied im Energieaufnahmevermögen<sup>36</sup> zwischen den mehrfachen und den repetierenden Belastungen zu erkennen. [Kan83] kommt ferner zu dem Schluss, dass bei einer Impulsanzahl von etwa sechs Impulsen die einbringbare Energie nicht weiter abnimmt.

<sup>33</sup> Die Art der Belastung war ein Rechteckimpuls mit einer Scheiteldauer von 2 ms.

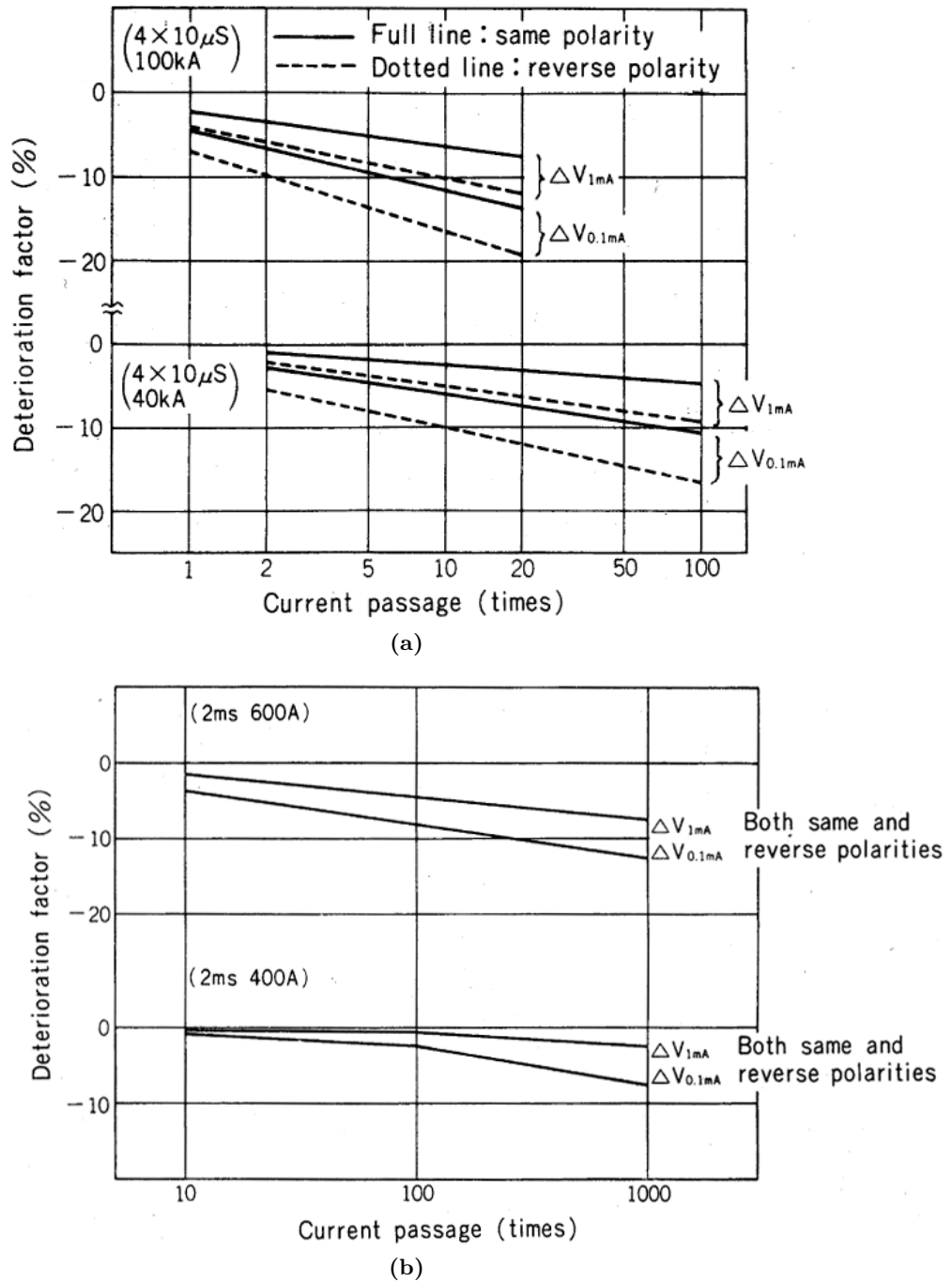
<sup>34</sup> Mehrfachbelastungen, wie in Kapitel 2.3 beschrieben.

<sup>35</sup> Repetierende Belastungen, siehe Kapitel 2.3.

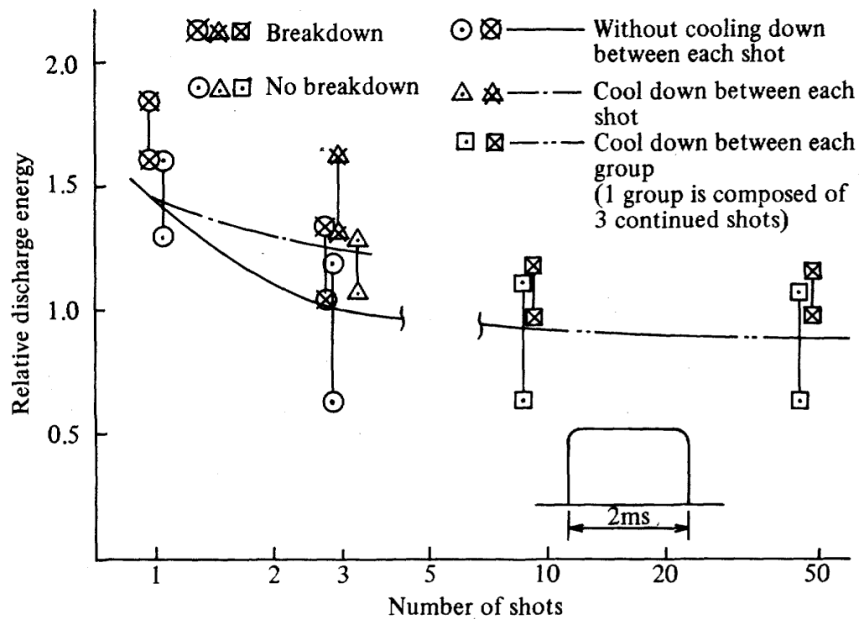
<sup>36</sup> Der Veröffentlichung ist nicht zu entnehmen, ob bei der Belastung einer Gruppe bestehend aus drei Impulsen der Energieinhalt eines einzelnen Energieeintrags oder die Summenenergie die von den drei aufeinanderfolgenden Impulsen eingebracht werden konnte, als Ausfallenergie bezeichnet wird. Da keine Aussage über die Kontaktierung der MO-Varistoren in der Prüflingsaufnahme getroffen wird und somit keine Informationen zur Wärmeabgabe zwischen den einzelnen Impulsen gegeben ist, lässt sich auch nicht folgern, ob als Ausfallenergie einer Gruppe von Impulsen die Summenenergie oder die Energie eines einzelnen Impulses angesetzt wurde.



## 2.5 Stand des Wissens zum Einzel- und Mehrfachimpulsenergieaufnahmevermögen



**Abbildung 2.9:** Kennlinienalterung von MO-Varistoren durch repetierende Belastungen [Hie74] ©1974 Meidensha



**Abbildung 2.10:** Energieaufnahmevermögen für Rechteckimpulse mit einer Scheiteldauer von 2 ms in Abhängigkeit der Impulsanzahl [Kan83] ©1983 IEEE

Im gleichen Zeitraum veröffentlichte [Eda84] seine Untersuchungen zu den Ausfallmechanismen von MO-Varistoren durch Impulsbelastungen. In seinen praktischen Untersuchungen an MO-Varistoren (Durchmesser von 10 mm bis 115 mm, Höhe von 1 mm bis 20 mm) aus Eigenproduktion wertet er die Stromdichte des Energieeintrags in Abhängigkeit der Länge des Energieeintrags aus. Dabei stellt er erstmalig die näherungsweise lineare Abnahme (in der doppelt logarithmischen Darstellung) der Dauer bis zum Ausfall des MO-Varistors mit steigender eingepprägter Stromdichte fest<sup>37</sup>. Weiterhin stellt er fest, dass das volumenbezogene Energieaufnahmevermögen mit steigendem Durchmesser (bei gleicher Höhe und somit zunehmendem Volumen) der MO-Varistoren sinkt, was er mit zunehmenden Inhomogenitäten der MO-Varistoren mit steigendem Durchmesser erklärt. Abschließend untersucht er das Ausfallverhalten der MO-Varistoren durch Computersimulationen und stellt fest, dass die Zerstörungsenergie von der Homogenität der Prüfkörper bestimmt wird und anhand dieser abgeschätzt werden kann.

[Swe89] beschreibt in seiner Veröffentlichung die Entwicklung eines MO-Varistors (in der Serienfertigung haben sie einen Durchmesser von 50 mm bis 109 mm und eine Höhe von 18,5 mm) mit einem Energieaufnahmevermögen<sup>38</sup> von  $1000 \text{ J/cm}^3$  für den Einsatz zum

<sup>37</sup> Die Untersuchung führte er jedoch an Niederspannungsvaristoren mit einem Durchmesser von 14 mm und einer Höhe von 1,3 mm durch.

<sup>38</sup> Heute liegt das spezifizizierte Energieaufnahmevermögen herstellerübergreifend bei  $200 \text{ J/cm}^3$  bis  $300 \text{ J/cm}^3$  [Hin12].

## 2.5 Stand des Wissens zum Einzel- und Mehrfachimpulsenergieaufnahmevermögen

Schutz von Kondensatoren (siehe Kapitel 2.1). Aus diesem Grund testet [Swe89] das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen mit Wechselstromenergieeinträgen bei Stromdichten<sup>39</sup> von etwa  $0,04 \text{ A/cm}^2$  bis  $0,2 \text{ A/cm}^2$ . Zusammenfassend stellt er fest, dass solch hohe Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen an MO-Varistoren mit geringerem Volumen als Spitzenwerte erreichbar sind, in der Serienproduktion jedoch die mit geringem Risiko spezifizierbare Energie deutlich darunter liegt<sup>40</sup>.

Eine weitreichende Untersuchung zur Mehrfachimpulsbelastbarkeit von MO-Varistoren bzw. Überspannungsableitern der Mittelspannungsebene wurde von Darveniza durchgeführt und beispielsweise in [Dar94], [Dar97], [Dar98] und [Dar00] veröffentlicht. In seinen Untersuchungen erzeugt er Einfach- und Mehrfachimpulsbelastungen (die Impulse wurden in Zeitabständen von 15 ms bis 150 ms erzeugt) mit Impulsstoßströmen der Form  $8/20 \mu\text{s}$  (Stromscheitelwerte von 5 kA bis 10 kA) sowie  $4/10 \mu\text{s}$  (Stromscheitelwerte bei Einfachbelastungen von 65 kA bis 100 kA bei Mehrfachbelastungen von 15 kA) und stellt fest, dass die *UI*-Kennlinie durch diese Belastungen nicht messbar verändert<sup>41</sup> wurde. Er stellt jedoch fest, dass, initiiert durch multiple Belastungen, verstärkt Überschläge durch die (bzw. zwischen MO-Varistor und) Glasur auftreten. Diese Überschläge sind unabhängig vom Umgebungsgas (seine Untersuchungen schlossen  $\text{SF}_6$  als Umgebungsmedium ein), dessen Druck sowie dessen Feuchtigkeitsgehalt. Einzig Optimierungen der Glasur bzw. direkter Verguss der MO-Varistoren mit einem Polymer können das Überschlagsverhalten verbessern. In [Dar98] wird die Vermutung geäußert, dass die Überschläge von Vorentladungen an den Elektroden initiiert werden, weshalb bei Impulsstrombelastungen große Sorgfalt auf die Kontaktierung bzw. die Ausführung der Elektroden gelegt werden sollte. Am Rande stellt er fest, dass in Regenwasser gelagerte MO-Varistoren bzw. MO-Varistoren, die nass geprüft werden, kein höheres Ausfallrisiko zeigen. Das Energieaufnahmevermögen wertet Darveniza nicht aus, stellt jedoch fest, dass bei multiplen Belastungen (durch den Temperaturanstieg aufgrund der Summenenergie der einzelnen Impulse) die Gefahr der thermischen Instabilität besteht.

In der Veröffentlichung von [Mar96] wird das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen mit Doppelsexponentialstoßströmen mit einer Länge von  $860 \mu\text{s}$  bis  $18\,000 \mu\text{s}$  untersucht. Pro Impulsform prüft er 20 bis 25 MO-Varistoren und wertet die Ergebnisse statistisch aus. Er

<sup>39</sup> Wie spätere Untersuchungen zeigen, ist das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen bei kleinen Stromdichten geringer als bei hohen Stromdichten.

<sup>40</sup> Ferner wird in der Veröffentlichung beschrieben, dass letztendlich bei der Auslegung der Anwendung ein vergleichsweise hohes Energieaufnahmevermögen der MO-Varistoren von  $500 \text{ J/cm}^3$  spezifiziert wurde.

<sup>41</sup> Er prüft die Kennlinie im Vordurchbruchbereich mit einem Gleichstrom von 1 mA und im Hochstrombereich die Restspannung bei 5 kA und bei Dauerspannung die Verlustleistung. Dabei wurden Änderungen kleiner als 10 % als unkritisch angenommen.

stellt ebenfalls fest, dass das Energieaufnahmevermögen von der eingepprägten Stromdichte abhängig ist.

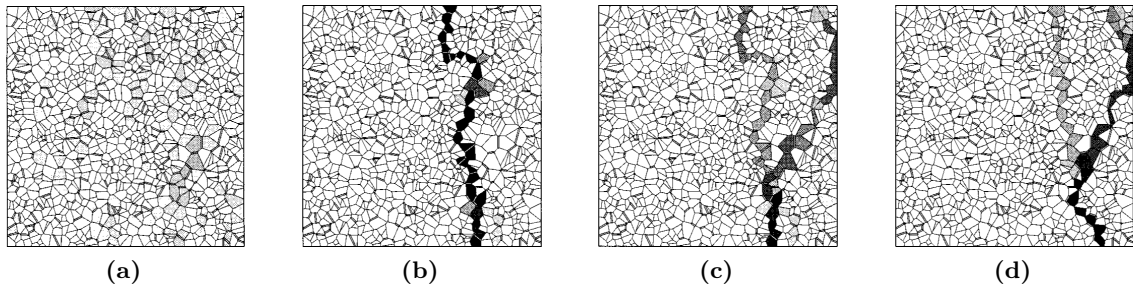
Eine weitere umfangreiche und international anerkannte Untersuchung stammt von [Rin97]. Er untersucht das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen von MO-Varistoren der Hochspannungsebene mit Wechselstromenergieeinträgen und Rechteckimpulsen bis zum mechanischen Ausfall über einen weiten Strombereich (Stromscheitelwerte von 0,84 A bis 35 200 A). Dabei prüft er 19 bis 55 MO-Varistoren pro Stromdichte und wertet die Ergebnisse mit verschiedenen Verteilungsfunktionen aus, wobei keine der verwendeten Verteilungsfunktionen alle Fälle abdeckt und er somit die Normalverteilung weiter verfolgt. Auch [Rin97] stellt eine Zunahme des Energieaufnahmevermögens mit steigender Stromdichte des Energieeintrags sowie die lineare Abhängigkeit (in der doppelt logarithmischen Darstellung) zwischen Stromdichte und Impulsdauer bis zum mechanischen Ausfall des MO-Varistors fest. Die Art des mechanischen Ausfalls (Durchschlag, Zerschlagen oder Überslag) des MO-Varistors ist dabei abhängig von der Stromdichte des Energieeintrags.

Im gleichen Zeitraum entstanden die Simulationsergebnisse von Bartkowiak, die beispielsweise in [Bar96b], [Bar96a], [Bar99] und [Bar01] veröffentlicht wurden. Er simuliert Korngrößenverteilungen, Verteilungen von Korngrenzen mit unterschiedlichen elektrischen Eigenschaften<sup>42</sup> sowie unterschiedliche Spannungsbelastungen (die zu unterschiedlich hohen Stromflüssen führen) von MO-Varistoren der Mittel- und Hochspannungsebene. Dabei wertet er als Ausfall, wenn Grenzwerte von mechanischen Spannungen<sup>43</sup> (unterschiedlich für axiale bzw. tangentielle Richtung), der Temperatur in einem Kanal oder im Mittel im MO-Varistor (wegen der thermischen Stabilität) überschritten wurden. Er stellt fest, dass die Ursache eines mechanischen Ausfalls<sup>44</sup> von der Stromdichte des Energieeintrags (diese Ergebnisse werden mit den experimentellen Untersuchungen von [Rin97] abgeglichen), der Homogenität des MO-Varistors, dessen *UI*-Kennlinie (die sich nach seiner Aussage durch eine höhere Zugabe von  $\text{Al}_2\text{O}_3$  verbessern lässt) und von der Geometrie des MO-Varistors abhängig ist. Bei sehr ausgeprägter Nichtlinearität kommt es nach seinen Simulationen zu einer ausgeprägten Strompfadbildung (wie in *Abbildung 2.11* zu sehen), die von der Summen-*UI*-Kennlinie der einzelnen Strompfade abhängig ist und folglich bei Spannungsbelastungen im Bereich der größten Nichtlinearität der *UI*-Kennlinie zu

<sup>42</sup> Es sei kritisch angemerkt, dass die elektrische Charakteristik im Hochstrombereich als temperaturunabhängig angenommen wurde.

<sup>43</sup> [Rei08] merkt kritisch an, dass Bartkowiak bei seinen Simulationen von einer freien Ausdehnungsmöglichkeit des MO-Varistors in axialer Richtung ausgeht, was bei MO-Varistoren, die in Überspannungsableiter eingebaut sind, nicht generell gegeben ist (siehe Kapitel 2.1), jedoch die mechanischen Spannungen im MO-Varistor beeinflusst.

<sup>44</sup> Für kleine Stromdichten sagt er ein Aufschmelzen von einzelnen Kanälen voraus (Durchschlag), wohingegen bei hohen Stromdichten der Bruch bei MO-Varistoren für Mittelspannungsanwendungen wahrscheinlicher werde.



**Abbildung 2.11:** Simulierte Verteilung des Stromes (dunkle Flächen werden von einem höheren Strom durchflossen, wobei alle Stromdichten auf den Gesamtstrom normiert wurden) eines MO-Varistors bei unterschiedlich starken Spannungsbelastungen (aufsteigend von (a) nach (d)) vom Vordurchbruchbereich bis hin zum Durchbruchbereich der *UI*-Kennlinie [Bar96b] ©1996 AIP Publishing LLC

den ausgeprägtesten Strompfadbildungen führt. Für einen MO-Varistor der Mittelspannungsebene errechnet er ein Minimum des Energieaufnahmevermögens von etwa  $300 \text{ J/cm}^3$  bei einer Stromdichte von etwa  $1 \text{ A/cm}^2$ . Er folgert weiterhin, dass die Stromverteilung bei Hochstoßstromimpulsen der Form  $4/10 \mu\text{s}$  sehr homogen und deshalb die Belastung zur Prüfung des Energieaufnahmevermögens (zur Qualitätsbeurteilung) ungeeignet sei [Bar01].

In der Dissertation von [Den98] wird die Impulsalterung von MO-Varistoren der Mittel- und Hochspannungsebene durch Doppelexponentialstoßströme der Form  $0,5/80 \mu\text{s}$ ,  $1/20 \mu\text{s}$ ,  $4/10 \mu\text{s}$  und  $8/20 \mu\text{s}$  auch unter Berücksichtigung der Effekte der im Betrieb anliegenden Wechselspannung untersucht. Hierbei wird ein Schwerpunkt auf repetierende Belastungen mit größtenteils 400 und bis zu 1500 Impulsen gelegt. Bei den vielen Variationen der Belastungsarten stellt er fest, dass die Restspannung durch die Belastungen nicht messbar beeinflusst wird, die *UI*-Kennlinie im Vordurchbruchbereich hingegen schon (er führte Messungen der Verlustleistung bei Dauerspannung durch und identifiziert darüber die Änderungen im Vordurchbruchbereich). Bei gleichem Scheitelwert der Stromdichte erzeugen Stoßströme mit höherer Steilheit eine stärkere Erhöhung der Verlustleistung, ein höherer Stromscheitelwert erzeugt bei gleicher Impulsform ebenfalls einen stärkeren Anstieg der Verlustleistung. Dabei erzeugt der erste Impuls bei repetierenden Belastungen die größte Änderung (bei unipolaren Belastungen steigt die Verlustleistung stärker an, als wenn die Polarität der Impulsbelastung alterniert), Dengler konnte jedoch keinen Sättigungseffekt feststellen. Ob der Energieinhalt des Impulses einen Einfluss auf die Veränderung der *UI*-Kennlinie hat, konnte er nicht nachweisen. Die repetierenden Belastungen führt er in Sequenzen aus mehreren Impulsen durch, wobei der MO-Varistor im Zeitraum zwischen zwei Impulsen (etwa 5 min) abkühlen konnte und zwischen den Sequenzen teilweise mehrere

Tage lagen. Nach seinen Untersuchungen hatte der Abstand zwischen den Impulsen jedoch keinen Einfluss auf den Verlustleistungsanstieg. Dengler beobachtet Überschlüge infolge von repetierenden Belastungen<sup>45</sup>, wobei beim Vergleich mehrerer Impulsformen bei langsameren Impulsen (bei gleichem Energieinhalt) schon bei geringeren Impulszahlen Überschlüge beobachtet werden.

In den Simulationen von [Bog00] wird der Einfluss des Freirandes (Differenz des MO-Varistor-Radius und des Radius der Metallisierung, die auf den MO-Varistor aufgebracht wurde) auf das Energieaufnahmevermögen untersucht. Ist der Freirand zu groß, steigt die Stromdichte am Rand der Metallisierung im Metalloxid stark an, was zu einer lokalen Erwärmung und damit bei hohen Energieeinträgen zum Aufschmelzen des Metalloxids führen kann. Ein zu kleiner Freirand kann jedoch bei hohen Impulsbelastungen zu Überschlügen über den MO-Varistor führen. [Bog00] kommt zu dem Schluss, dass ein Optimum für die untersuchte Geometrie, mit einem Durchmesser von 46 mm und einer Höhe von 23 mm, bei einem Freirand von 0,3 mm bis 0,6 mm liegt<sup>46</sup>.

In der Dissertation von [Kle04] werden die Einflüsse durch einfache und multiple Impulsstoßströme der Form  $4/10\text{ }\mu\text{s}$ ,  $8/20\text{ }\mu\text{s}$  und  $30/60\text{ }\mu\text{s}$  auf die *UI*-Kennlinie von MO-Varistoren der Mittel- und Hochspannungsebene untersucht. Bei den multiplen Belastungen konnten sechs Einzelimpulse in Zeitabständen von 0,05 s bis 10 s mit variabler Polarität erzeugt werden. Wie bereits bekannt war, erzeugen hohe Stromsteilheiten und Scheitelwerte der Stromdichte Änderungen der *UI*-Kennlinie im Vordurchbruchbereich. Er stellt jedoch weiterhin fest, dass der Energieinhalt des Stoßstromes die *UI*-Kennlinie ebenfalls negativ beeinflusst, jedoch der mit hohen Energieeinträgen verbundene Temperaturanstieg im MO-Varistor zu Regenerationsprozessen führen kann, die die Asymmetrie<sup>47</sup> des Referenzstromes reduzieren können. Bei multiplen Belastungen stellt auch er fest, dass der erste Stoßstrom die größte *UI*-Kennlinienveränderung im Vordurchbruchbereich erzeugt, kann aber weiterhin nachweisen, dass Polaritätswechsel diese Änderung revidieren können. Aus diesem Grund hat bei multiplen Belastungen die Reihenfolge der Polaritäten einen Einfluss auf die Referenzspannungsänderung der Impulssequenz. Ein Einfluss des Zeitabstandes zwischen den Impulsen auf die Referenzspannungsänderung konnte nicht nachgewiesen werden. Er folgert, dass multiple Belastungen mit Impulsstoßströmen weniger kritisch als ein einzelner Energieeintrag (bei vergleichbarem Summenenergieeintrag) sei, da die Stromdichte bei multiplen Belastungen geringer ist. Beim Überschlagverhalten können multiple Belastungen

<sup>45</sup> Fiel ein MO-Varistor infolge einer Impulsbelastung durch einen Überschlag oder Durchschlag aus, ging diesem Ausfall keine Änderung der Verlustleistung voraus.

<sup>46</sup> Die im Kapitel 5 untersuchten MO-Varistoren sind überwiegend freirandlos.

<sup>47</sup> Die Stromasymmetrie bezeichnet den Unterschied zwischen positiver und negativer Stromamplitude, bei anliegender betriebsfrequenter Wechselspannung.

## 2.6 Stand der internationalen Überspannungsableiter-Normung in IEC und IEEE

kritischer sein, da für Überschlüsse das Verhalten der Glasur bzw. deren Spannungsfestigkeit bei höheren Temperaturen eine entscheidende Rolle spielt. Da das Aufheizen der Glasur einige 10 ms in Anspruch nehmen kann ([Kle04]), steigt das Außenüberschlagsrisiko mit zunehmendem Zeitabstand zwischen den Belastungen einer Stoßstromsequenz.

In der Untersuchung von [He07] wird exemplarisch das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen mit Wechselstromenergieeinträgen, Rechteckimpulsen mit 8 ms und 2 ms Scheiteldauer, sowie einem Stoßstromimpuls der Form  $8/20 \mu\text{s}$  bestimmt. Weiterhin werden Simulationen zur Stromverteilung und zum Energieaufnahmevermögen in Abhängigkeit des eingepprägten Stromes, der Inhomogenität der Mikrostruktur und der Inhomogenität der elektrischen und thermischen Charakteristik beeinflusst. In der Veröffentlichung werden erstaunlich geringe experimentell ermittelte, mittlere Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen von  $216 \text{ J/cm}^3$  bis  $575 \text{ J/cm}^3$  für MO-Varistoren mit einer Höhe von 10 mm und einem Durchmesser von 32 mm genannt, wobei das geringste Energieaufnahmevermögen bei einem Rechteckimpuls mit 2 ms Scheiteldauer auftritt. Das geringe Energieaufnahmevermögen scheint offensichtlich dem sehr inhomogenen Material (kommerziellen Ursprungs<sup>48</sup>) geschuldet zu sein.

Sehr umfassende Ergebnisse zum Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen von MO-Varistoren sind in der Dissertation [Rei08] und ebenfalls in [Cig13a] veröffentlicht. Da die beschriebenen Untersuchungen vom Autor dieser Arbeit zum Teil begleitet und später weitergeführt wurden, sind die Ergebnisse im Hauptteil (im Kapitel 5.1) dargestellt.

## 2.6 Stand der internationalen Überspannungsableiter-Normung in IEC und IEEE

In diesem Unterkapitel soll ein kurzer Überblick über den Stand der internationalen Normung zum Energieaufnahmevermögen von Überspannungsableitern der Mittel- und Hochspannungsebene in IEC (International Electrotechnical Commission) sowie wegen der Relevanz<sup>49</sup> in IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) gegeben werden. Aus IEC soll die [IEC60099-4] und aus IEEE die [IEEEC62.11-2012] betrachtet werden.

<sup>48</sup> Aufgrund der Autoren der Veröffentlichung, des Standortes der Universität, an der die Untersuchungen durchgeführt wurden und der Förderung, die sie erhalten haben, darf vermutet werden, dass es sich bei dem einzigen Hersteller um einen chinesischen handelt.

<sup>49</sup> Der IEEE-Standard ist ein Standard, der aufgrund der Größe und Offenheit des Marktes für internationale Hersteller interessant ist. Da er große Unterschiede zum IEC-Standard aufweist (was bei anderen nationalen Standards, wie z. B. dem europäischen, australischen, japanischen usw. nicht der Fall ist (siehe z. B. [Hin07])) soll dieser hier gesondert betrachtet werden.

Die [IEC60099-4] wird zum aktuellen Zeitpunkt, basierend auf den aktuellen Forschungsergebnissen vor allem der TU Darmstadt in Zusammenarbeit mit den Cigré-Arbeitsgruppen A3.17 und A3.25, überarbeitet. Da die neue Version voraussichtlich grundlegende Änderungen betreffend der Prüfungen zum Energieaufnahmevermögen enthalten wird, soll der Stand der Diskussion anhand des [IEC-37/416/FDIS] ebenfalls dargestellt werden.

Da in den genannten Normen hauptsächlich Standardanwendungen von Überspannungsableitern abgedeckt werden, spielt die Prüfung des thermischen Energieaufnahmevermögens eine zentrale Rolle. Darüber hinaus wird das Impulsenergieaufnahmevermögen in weiteren Prüfungen nachgewiesen<sup>50</sup>. Die Normen trennen dabei die Prüfungen für Überspannungsableiter der Mittel- und Hochspannungsebene, da bei diesen unterschiedlichen Anwendungen unterschiedliche Belastungen im Betrieb auftreten können<sup>51</sup>. Wie bereits beschrieben, spielt für das thermische Energieaufnahmevermögen das Zusammenspiel aus Gehäuse und MO-Varistoren eine entscheidende Rolle, jedoch können Degradationserscheinungen der MO-Varistoren (die einen Verlustleistungsanstieg bei Dauerspannung verursachen) die Prüfung ebenfalls negativ beeinflussen. Aus diesem Grund enthalten sowohl [IEC60099-4], [IEC-37/416/FDIS] als auch [IEEEC62.11-2012] Konditionierungsbelastungen der MO-Varistoren vor der Prüfung der thermischen Stabilität. Für Überspannungsableiter der Hochspannungsebene wird dies in [IEC60099-4] zum einen durch 20 Nennableitstoßströme der Form  $8/20\text{ }\mu\text{s}$  (in definierten Abständen), die der betriebsfrequenten Wechselspannung (bei um 20 % erhöhter Dauerspannung) überlagert werden, erreicht. Zum anderen werden die Prüflinge mit zwei Hochstoßstromimpulsen der Form  $4/10\text{ }\mu\text{s}$  bei einem Stromscheitelwert von maximal 100 kA ( $\pm 10\%$ ) belastet<sup>52</sup>. Diese sehr aufwändige Prüfung (der Einfluss der Stoßstromimpulse der Form  $8/20\text{ }\mu\text{s}$  kann auf Grund der Erkenntnisse von z. B. [Den98] und [Kle04] infrage gestellt werden) wurde in [IEC-37/416/FDIS] auf die Hochstoßstromimpulse reduziert. In der aktuellen [IEEEC62.11-2012]<sup>53</sup> wird in der Prüfung für Überspannungsableiter der Hochspannungsebene eine Konditionierung mit 18 Rechteckimpulsen (definierter Abstände) sowie zwei Hochstoßstromimpulsen der Form  $4/10\text{ }\mu\text{s}$  mit einem Stromscheitelwert von 65 kA gefordert.

Der Nachweis des Impulsenergieaufnahmevermögens wird in den drei Normen über separate Prüfungen geführt. Die ältere [IEC60099-4] verfolgt den Ansatz, dass ein Impulsenergieauf-

<sup>50</sup> Naturgemäß werden in Norm-Prüfungen Herstellerangaben bei kritischen Betriebsbedingungen nachgewiesen und keine Grenzwerte für Belastungen ermittelt, was die Prüfungen von wissenschaftlichen Untersuchungen unterscheidet.

<sup>51</sup> Als Beispiel sei der international zwischen den Spannungsebenen unterschiedlich gehandhabte Erdseilschutz für die Mittel- und Hochspannungsebene genannt.

<sup>52</sup> Für Überspannungsableiter der Mittelspannungsebene können die Stromscheitelwerte niedriger gewählt werden. Außerdem ist der zweite Hochstoßstromimpuls für diese Überspannungsableiter auch gleichzeitig der Energieeintrag für die Prüfung der thermischen Stabilität.

<sup>53</sup> Die [IEEEC62.11-2012] ist auch für Überspannungsableiter mit Funkenstrecke gültig.



nahmevermögen höher als das thermische Energieaufnahmevermögen nur geringe Relevanz hat. Aus diesem Grund wird die Belastbarkeit mit der Nennenergie abgeprüft. Hierzu werden drei MO-Varistoren einzeln mit 18 Rechteckimpulsen von 2 ms bis 3,2 ms Scheiteldauer (je nach Leitungsentladungsklasse) in sechs Sequenzen zu je drei Impulsen belastet. Die Zeitdauer zwischen den einzelnen Impulsen beträgt 50 s bis 60 s, und zwischen den Sequenzen werden die MO-Varistoren auf Umgebungstemperatur abgekühlt<sup>54</sup>. Die Prüfung gilt als bestanden, wenn kein MO-Varistor ausgefallen ist, d. h. mechanisch geschädigt wurde, oder seine Restspannung sich bei einem Nennableitstoßstrom um mehr als 5 % geändert hat.

Diese Prüfung wurde in [IEC-37/416/FDIS] ebenfalls deutlich weiter entwickelt. Sie wird nun in einem ersten Durchlauf an zehn MO-Varistoren<sup>55</sup> durchgeführt. Die Impulsdauer wird nur noch eingeschränkt (Rechteckimpulse mit 2 ms bis 4 ms Scheiteldauer oder unipolare Sinushalbwellen gleicher Gesamtdauer)<sup>56</sup> und die Impulsfolge wird auf zehn Sequenzen zu je zwei Impulsen reduziert, wobei die Zeitdauer zwischen den einzelnen Impulsen einer Sequenz weiterhin 50 s bis 60 s beträgt und zwischen den Sequenzen die MO-Varistoren weiterhin auf Umgebungstemperatur abgekühlt werden. Die statistische Aussagekraft wird dadurch verbessert, dass die Prüfung auch bestanden ist, wenn ein MO-Varistor ausfallen sollte. Fallen von zehn MO-Varistoren zwei aus, muss die Prüfung wiederholt werden und bei der Wiederholung darf kein MO-Varistor ausfallen (bei mehr als zwei Ausfällen im ersten Durchlauf gilt die Prüfung als nicht bestanden). Als ausgefallen gilt ein MO-Varistor, wenn er mechanische Schäden aufweist (ausgenommen Beschädigungen der Metallisierung), sich die Referenzspannung oder die Restspannung infolge der Belastungen um mehr als 5 % geändert hat oder er bei den zwei anschließend durchgeführten Stoßstrombelastungen der Form  $8/20 \mu\text{s}$  mit erhöhter Stromdichte ( $0,5 \text{ kA/cm}^2$  oder doppeltem Nennstrom, der geringere Wert wird verwendet) mechanisch ausfällt. Viel weitreichender ist jedoch die Änderung der Definition der Belastungsart, die von Energiebelastung auf Ladungstransfer (jede Belastung muss mit 110 % dieses Wertes erfolgen<sup>57</sup>) geändert wurde. Weiterhin ist das vom Hersteller spezifizierte Ladungstransfervermögen nicht an das thermische Energieaufnahmevermögen<sup>58</sup> gekoppelt.

<sup>54</sup> Für Überspannungsableiter der Mittelspannungsebene werden Scheiteldauern der Rechteckimpulse von 0,5 ms bzw. 1 ms und sehr niedrige Werte der Stromscheitelwerte von 50 A bzw. 75 A (je nach Typ) gefordert. Leitungsableiter (ohne Funkenstrecke) werden mit einem Doppelsexponentialstoßstrom mit einer Gesamtdauer von  $200 \mu\text{s}$  bis  $230 \mu\text{s}$  belastet.

<sup>55</sup> Die Dimensionen werden klarer definiert.

<sup>56</sup> Für Überspannungsableiter der Mittelspannungsebene können Doppelsexponentialstoßströme der Form  $8/20 \mu\text{s}$ , für Leitungsableiter Doppelsexponentialstoßströme mit einer Länge von  $200 \mu\text{s}$  bis  $230 \mu\text{s}$  verwendet werden.

<sup>57</sup> Damit wird dem Umstand Rechnung getragen, dass die Prüfung zwar an einzelnen MO-Varistoren durchgeführt wird, jedoch den spezifizierten Wert des gesamten Überspannungsableiters nachweisen soll.

<sup>58</sup> Bei Überspannungsableitern der Mittelspannungsebene das thermische Ladungsableitvermögen.

Die früher erschienene<sup>59</sup> Norm [IEEEC62.11-2012] verfolgt den gleichen Ansatz wie die [IEC-37/416/FDIS], lässt für die Belastung jedoch ausschließlich Rechteckimpulse (im gleichen Zeitbereich wie [IEC-37/416/FDIS]) zu und führt in der Ausgangsmessung keinen Stoßstromimpuls der Form  $8/20\text{ }\mu\text{s}$  mit erhöhter Stromdichte ein. Weiterhin sind die Überspannungsableiter der Mittelspannungsebene von dieser Prüfung ausgenommen. Es sei noch einmal darauf hingewiesen, dass die thermische Stabilitätsprüfung für Überspannungsableiter der Hochspannungsebene eine Konditionierung mit 18 Rechteckimpulsen (äquivalent zu denen die für die Prüfung der thermischen Stabilität verwendet werden) enthält. Für Überspannungsableiter der Mittelspannungsebene sind die Rechteckimpulse nicht als Konditionierung in der thermischen Stabilitätsprüfung enthalten, weshalb in einer gesonderten Prüfung die Ableitfähigkeit von Rechteckimpulsen nachgewiesen wird.

---

<sup>59</sup> Die für die Normen zuständigen Arbeitsgruppen stimmen sich in regelmäßigen Abständen ab, trotzdem ist bislang keine völlige Harmonisierung zwischen den Überspannungsableiternormen in IEC und IEEE gelungen.

### 3 Motivation und Ziele der Arbeit

Wie im Kapitel 2.6 dargestellt, sind (bzw. waren parallel zu den in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen) die Prüfungen zum Impulsenergieaufnahmevermögen in der internationalen Normung stark im Umbruch. In den bisher veröffentlichten Untersuchungen zum Energieaufnahmevermögen von MO-Varistoren (wie in Kapitel 2.5 beschrieben) sind repetierende und multiple Energiebelastungen nur sehr selten und wenig systematisch untersucht worden. Die untersuchten Mehrfachbelastungen beschränkten sich bislang hauptsächlich auf Impulsbelastungen mit hohen Stromscheitelwerten und Stromsteilheiten, jedoch geringem Energieinhalt, wobei bereits ein Einfluss der Energie auf die Änderung der *UI*-Kennlinie (z. B. von [Kle04]) festgestellt wurde.

Impulsbelastungen mit geringem Energieinhalt sind nicht prinzipiell auf Belastungen mit höherem Energieinhalt übertragbar, wie z. B. aus dem Studium der Mikrostruktur von MO-Varistoren ersichtlich ist. Prinzipielle Unterschiede im Schädigungsverhalten durch Impulsbelastungen unterschiedlicher Stromdichte und Stromsteilheit ergeben sich, da hohe Stromsteilheiten die Ladungsverteilung an der Korngrenze verändern, wohingegen höhere Energiedichten zu lokalen thermischen Überlastungen führen können. Weiterhin kann durch Sekundäreffekte bei hohen Energieeinträgen z. B. das Überslagverhalten verändert werden. [Kle04] stellte bei multiplen Belastungen mit größeren Zeitabständen ein höheres Überslagrisiko fest, wofür er eine höhere Temperatur des Glases (die eine Reduktion der dielektrischen Festigkeit zur Folge haben soll) verantwortlich machte. Weiterhin könnte die höhere Temperatur nach Belastungen mit hohen Energieeinträgen zu Regenerationerscheinungen im MO-Varistor ähnlich dem „Tempern“ führen (siehe z. B. [Stu90]).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Mehrfachimpulsbelastungen mit hohen Energieeinträgen noch nicht systematisch untersucht wurden, jedoch physikalische Effekte dafür sprechen, dass diese sich von Mehrfachimpulsbelastungen geringerer Energiedichte (die bereits untersucht wurden) unterscheiden. Da auch mögliche Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Energieeintragsarten, Polaritätseffekte, Impulsanzahlen, Materialabhängigkeiten, Zeitdauer zwischen den Energieeinträgen usw. bislang nur unzureichend erforscht sind, ist der Raum für mögliche Untersuchungen sehr groß. Ungünstigerweise

sind die Versuchsanlagen für relevante Energieeinträge in MO-Varistoren der Mittel- und Hochspannungsebene sowohl kosten- als auch volumenintensiv und Untersuchungen zu Mehrfachbelastungen sehr zeitaufwendig. Beides reduziert die Möglichkeiten zur Prüfung aussagekräftiger Stichproben, weshalb bei der Versuchsplanung ein Kompromiss zwischen der Anzahl der Prüflinge mit gleicher Belastung (um die Aussagekraft der Ergebnisse statistisch abzusichern) und der Anzahl der Belastungsarten (um die Auswirkungen von möglichst vielen Einflussfaktoren abschätzen zu können) gefunden werden muss.

Zur Eingrenzung der Fragestellung erscheint die Prüfung der nachfolgenden Einflussfaktoren bzw. Fragestellungen zum Mehrfachimpulsenergieaufnahmevermögen von MO-Varistoren sinnvoll, weshalb diese die Ziele der vorliegenden Arbeit darstellen:

- Wie verändert sich das Energieaufnahmevermögen bei schnell aufeinanderfolgenden multiplen Belastungen in Abhängigkeit von der Zeitdauer zwischen den Belastungen? Ab welcher Zeitdauer zwischen den Belastungen können diese als von einander getrennte Belastungen angenommen werden?
- Welchen Einfluss hat das Temperaturverhalten der *UI*-Kennlinie von MO-Varistoren auf deren interne Stromverteilung, und wie wirkt sich dies auf das Impulsenergieaufnahmevermögen aus?
- Welcher Zusammenhang besteht zwischen dem Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen und der Beständigkeit gegen repetierende Belastungen? Ist dieser Zusammenhang unabhängig von Stromdichte, Zeitdauer und Impulsform der Vorbelastung?
- Können Ausfälle infolge von repetierenden Energieeinträgen durch eine Auswertung der Änderungen der *UI*-Kennlinie des MO-Varistors vorhergesagt werden?

Durch Klärung dieser Fragestellungen können zum einen die erwähnten internationalen Normen im Hinblick auf aussagekräftigere Prüfungen zum Impulsenergieaufnahmevermögen weiter entwickelt werden. Dies könnte beispielsweise durch Klärung der Fragestellung, welchen Einfluss die Zeitdauer zwischen den Energieeinträgen und welchen die Dauer bzw. Stromdichte des Energieeintrags auf das Impulsenergieaufnahmevermögen hat bzw. wie stark diese in der Normprüfung eingegrenzt werden sollte, unterstützt werden. Auch die Fragestellungen, ob Ausfälle von MO-Varistoren bei repetierenden Belastungen sich durch Veränderungen der *UI*-Kennlinie ankündigen, ist für die Definition von Ausgangsmessungen (nach entsprechenden Belastungen) in Normen interessant.

Für die Hersteller und Anwender von MO-Varistoren ist der Einfluss von Vorbelastungen auf die Eigenschaften wie z. B. *UI*-Kennlinie und Impulsenergieaufnahmevermögen ebenfalls

von Interesse. Eine geeignete Stückprüfung der MO-Varistoren am Ende des Produktionsprozesses sollte mit minimalem Aufwand MO-Varistoren mit Fehlstellen (durch einen Ausfall während einer Belastung mit einem hohen Energieeintrag) eindeutig detektieren<sup>60</sup>. Gleichzeitig sollen jedoch die MO-Varistoren ohne Fehlstellen, die weiter verarbeitet werden sollen, möglichst gering verändert bzw. vorschädigt werden. Somit können Informationen, welche Energieeinträge sehr geringe Vorschäden hervorrufen und gleichzeitig MO-Varistoren mit geringem Energieaufnahmevermögen detektieren können, die Hersteller von MO-Varistoren bei der Auswahl von geeigneten Prüfbelastungen unterstützen.

Für die Hersteller von Überspannungsableitern kann das Wissen zum Mehrfachenergieaufnahmevermögen nützliche Hinweise für die Auslegung von Überspannungsableitern vor allem in Sonderanwendungen liefern. In diesen, wie z. B. dem Schutz von Kondensatoren in Serienkompensationsanlagen, können einzelne Belastungsarten mit hohen energetischen Belastungen in hoher Anzahl auftreten, weshalb hier die Informationen aus den vorgenannten Fragestellungen sehr gut übertragbar sind.

Für die Anwender von Überspannungsableitern der Mittel- und Hochspannungsebene könnte die Klärung der obigen Fragestellungen nützliche Hinweise liefern, ob in speziellen Anwendungen die Spezifikationen von Überspannungsableitern verfeinert werden müssen. Außerdem sind Hinweise, auf welche Art sich Ausfälle nach repetierenden Energieeinträgen ankündigen, von großem Interesse, um z. B. den Zustand von in Betrieb befindlichen Überspannungsableitern abschätzen zu können.

---

<sup>60</sup> Die Frage, ob ein völlig anderes Verfahren, z.B. ein nicht elektrisches, besser geeignet wäre, MO-Varistoren mit Fehlstellen zu detektieren, ist eine gesonderte Fragestellung, die nicht mit den oben stehenden Fragestellungen zu klären ist und deshalb im Rahmen dieser Arbeit nicht beantwortet werden kann.



## 4 Verwendete Versuchseinrichtungen

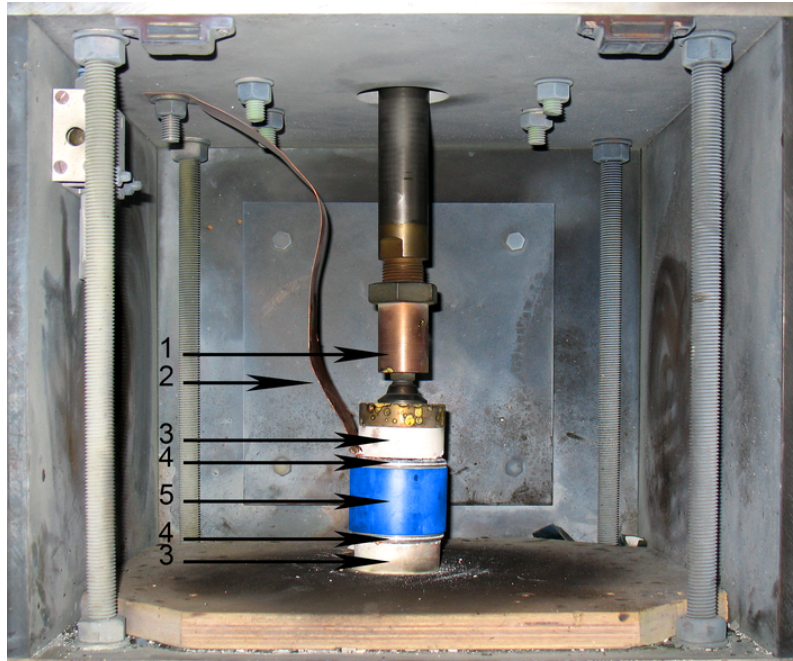
Im folgenden Kapitel werden die Versuchseinrichtungen, die für die Untersuchungen im Kapitel 5 verwendet werden, vorgestellt. Weiterführende Angaben zum Aufbau, den verwendeten Messmitteln etc. sind dem Anhang A zu entnehmen. Die Versuchseinrichtungen, bis auf das Alterungsprüfsystem, bestanden bereits seit den in [Rei08] beschriebenen Untersuchungen und wurden für die in der vorliegenden Arbeit dargestellten Untersuchungen angepasst und optimiert.

### 4.1 Prüflingsaufnahme

Der Prüflingsaufnahme kommt eine zentrale Bedeutung zu, da diese mit den Prüflingen in direktem Kontakt steht und somit von den hohen Impulsbelastungen, vielen Prüflingswechseln und Prüflingsausfällen direkt betroffen ist. Mit der Prüflingsaufnahme werden weiterhin die Rahmenbedingungen, wie Kontaktkraft der Elektroden, Wärmefluss in axialer und radialer Richtung, Umgebungsmedium und Umgebungstemperatur eingestellt. Für die Prüflingsaufnahme wird dabei die Philosophie verfolgt, dass diese einen realistischen, nicht den besten und nicht den kritischsten Fall eines Überspannungsableiteraufbaus nachbilden soll, um mit den gewonnen Ergebnissen eine möglichst hohe Praxisrelevanz zu erzielen.

Die Prüflingsaufnahme im Wechselstromprüfsystem und am Rechteckimpulsgenerator sind baugleich, eine Innenansicht dieser Prüfkammer ist in *Abbildung 4.1* dargestellt. Um eine Bewegung der Elektroden während eines Energieeintrags zu verhindern, werden die Kontaktelektroden mit einer Flächenlast von  $3 \text{ N/mm}^2$  (die von einem Druckluftzylinder erzeugt wird) an den Prüfling gepresst<sup>61</sup>. Dass diese Flächenlast ausreicht, um ein Abheben der Elektroden selbst während eines Hochstoßstromes der Form  $4/10 \mu\text{s}$  mit einem Stromscheitelwert von  $100 \text{ kA}$  zu verhindern, weist [Rei08] an einer äquivalenten Einspannvorrichtung nach.

<sup>61</sup> Die Verspannkraft von MO-Varistoren in Überspannungsableitern liegt nach Informationen eines Herstellers im ähnlichen Bereich, für direktvergossene Überspannungsableiter unter Umständen höher, sonst niedriger als die verwendete Verspannkraft in der Prüflingsaufnahme.



**Abbildung 4.1:** Prüflingsaufnahme im Wechselstromprüfsystem und Rechteckimpuls-generator (1 Krafteinleitung von Druckluftzylinder, 2 Prüfstromzuführung, 3 thermische Isolation, 4 Aluminiumelektrode, 5 Prüfling (Der Prüfling ist in der Abbildung aus Gründen der Anonymisierung durch Bildverarbeitung eingefärbt.))

Um einen Wärmefluss in axialer Richtung von dem (bzw. nach Prüflingswechseln zu dem) Prüfling zu reduzieren, wird zwischen der Einspannvorrichtung und der Kontaktelektrode eine thermische Isolation verwendet. Diese besteht aus dem Fibersilikat „Contherm FS 650“ mit einer Dicke von 19,1 mm und einer Wärmeleitfähigkeit von  $0,3 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m})$ . In radialer Richtung wird keine Isolation verwendet. Die den Prüfling umgebende Luft wird nach jedem Energieeintrag ausgetauscht, um den Einfluss von Abbrandprodukten (nach MO-Varistor-Ausfällen) und der Lufterwärmung zu reduzieren. Auf diese Weise wird die Einbausituation eines MO-Varistors z. B. in der Mitte des Aktivteiles in einem Überspannungsableiter im Rohrdesign (siehe Kapitel 2.1) nachgebildet<sup>62</sup>.

Zur Kontaktierung werden Aluminiumelektroden mit glatter Oberfläche und abgerundeten Kanten verwendet. Diese haben eine Höhe von 5 mm und einen Durchmesser, der 1 mm bis 2 mm kleiner als der des jeweils verwendeten Prüflings ist. Vor jedem Energieeintrag werden die Kontaktelektroden ausgetauscht, um Temperatur- und Schädigungseinflüsse zu vermeiden.

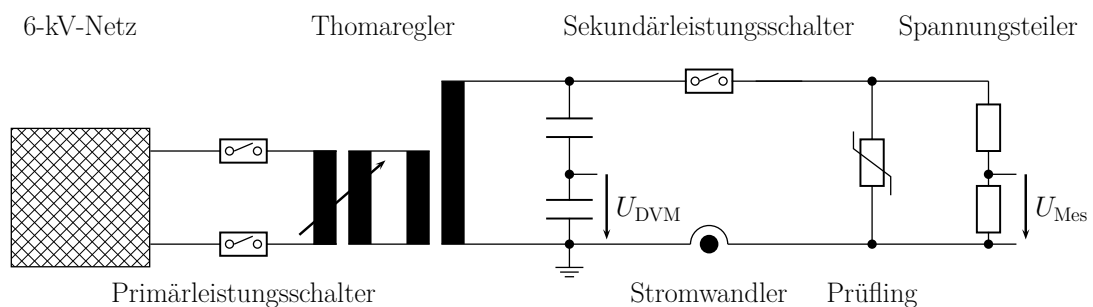
<sup>62</sup> Bei einem direktvergossenen Überspannungsableiter ist der Wärmefluss in radialer Richtung höher, was bei den kurzen untersuchten Energieeinträgen jedoch keinen Einfluss hat. Das Überschlagrisiko ist bei direktvergossenen MO-Varistoren geringer (siehe z. B. [Dar98]).



Die Prüflingsaufnahmen für spezielle Untersuchungen, wie z. B. Energieeinträge bei erhöhter Umgebungstemperatur oder Alterungsprüfungen, sind in den entsprechenden Abschnitten dargestellt.

## 4.2 Wechselstromprüfsystem

Mit Hilfe des Wechselstromprüfsystems können Prüflinge mit Energieeinträgen, eingebracht durch betriebsfrequente Wechselspannung, belastet werden. Das Prinzipschaltbild des Versuchskreises ist in *Abbildung 4.2* dargestellt. Der Prüfkreis wird direkt aus dem 6-kV-Netz versorgt und besteht als Hauptkomponente aus einem Thomaregler-Stelltransformator mit nachgeschaltetem Hochspannungstransformator. Mit diesem Prüfsystem ist es prinzipbedingt möglich, die Spannung stufenlos einzustellen, was für Energieeinträge an MO-Varistoren im Bereich hoher Nichtlinearität der *UI*-Kennlinie besonders wichtig ist. Der maximal einstellbare Effektivwert der Spannung beträgt durch den nachgeschalteten Hochspannungstransformator 10 kV, wodurch an den geprüften MO-Varistoren Energieeinträge mit Stromscheitelwerten von bis zu 300 A erreicht werden können.



**Abbildung 4.2:** Prinzipschaltbild des Wechselstromprüfsystems.  $U_{\text{DVM}}$  ist die Spannung, die an das Digitalvoltmeter zur Einstellung der Sollspannung übertragen wird;  $U_{\text{Mes}}$  ist die Spannung die an die PC-Messkarte übertragen wird.

Ein Energieeintrag wird, nach Einstellen der Sollspannung, durch Schließen des sekundären Leistungsschalters gestartet. Die am Prüfling abfallende Spannung wird mit Hilfe eines ohmschen Spannungsteilers und der durch den Prüfling fließende Strom mit Hilfe eines Halleffekt-Stromwandlers gemessen. Das Messsignal wird mit einem Lichtwellenleiterübertragungssystem übertragen und von einer PC-Messkarte erfasst. Mit Hilfe eines LabVIEW<sup>63</sup>-Programms wird der Energieeintrag ausgewertet und dokumentiert. Das Ende des Energieeintrags wird entweder durch den Ablauf der eingestellten Prüfdauer oder durch

<sup>63</sup> „Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench“ abgekürzt „LabVIEW“ ist ein grafisches Programmiersystem von National Instruments.

einen Prüflingsausfall bestimmt, der, sobald der Kurzschlussstrom erkannt wurde, den sekundären Leistungsschalter automatisch öffnen lässt. Da es sich bei dem sekundären Leistungsschalter um einen Leistungsschalter in Vakuumtechnik handelt, kann der Stromfluss nicht unmittelbar unterbrochen, sondern nur bei einem Strom-Nulldurchgang abgeschaltet werden. Dies hat zur Folge, dass die Stromflussdauer um eine Halbwelle streuen kann. Im Verlauf der Untersuchungen wurde der primäre Leistungsschalter durch einen Halbleiterschalter erweitert, mit dessen Hilfe ein phasenlagenbezogenes Zuschalten des unbelasteten Transformators und ein Abschalten unmittelbar beim nächsten Nulldurchgang des Stromes (nach einem erkannten Überstrom) möglich ist.

Ein beispielhaftes Oszillogramm von Strom und Spannung bei der Belastung eines MO-Varistors mit einem Wechselstromenergieeintrag<sup>64</sup> ist in *Abbildung 4.3* dargestellt. Die Spannungsform entspricht während des Stromflusses nur noch näherungsweise einem Sinus, was durch den Innenwiderstand des Transformators begründet ist (siehe [Rei08]). Die Spitzenwerte des Stromflusses der einzelnen Halbwelle variieren, was auch auf die Veränderungen des geprüften MO-Varistors zurückzuführen ist. In den in Kapitel 5 dargestellten Versuchen wird der niedrigste Stromscheitelwert einer vollständigen Halbwelle als Stromscheitelwert des Energieeintrags gewertet. Im dargestellten Fall wurde der MO-Varistor durch den Energieeintrag zerstört, was am deutlichen Stromanstieg zum Zeitpunkt 360 ms zu erkennen ist.

Weitere Angaben zu diesem Versuchskreis finden sich in Kapitel A.1.

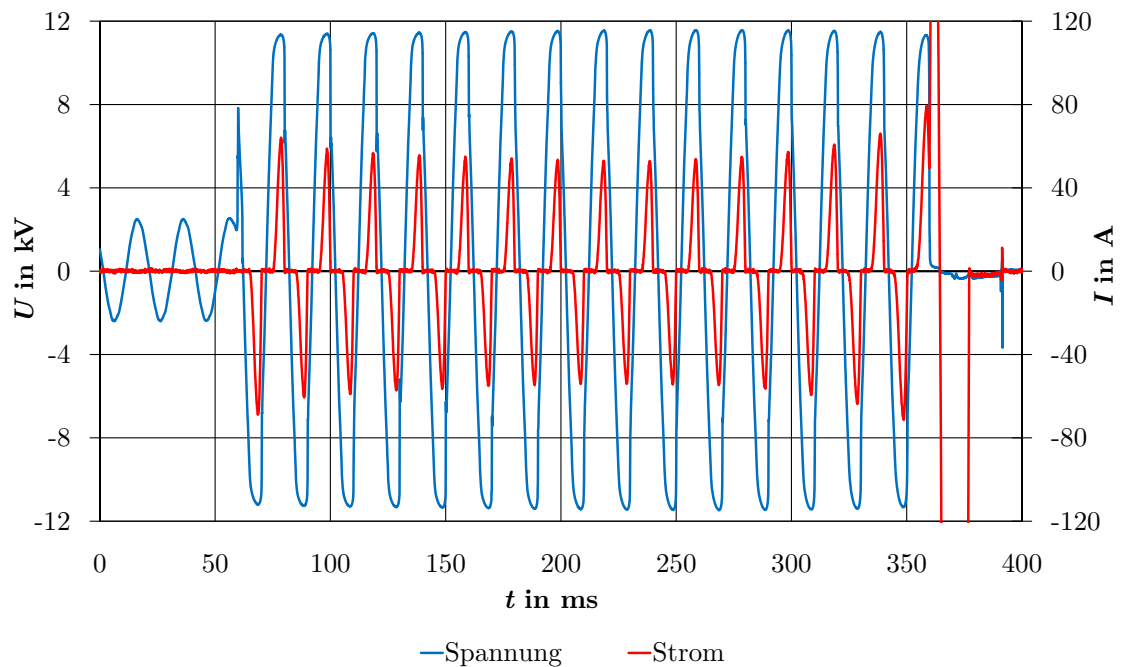
### 4.3 Rechteckimpulsgenerator

Mit dem Rechteckimpulsgenerator können Rechteckimpulse<sup>65</sup> verschiedener Scheiteldauern erzeugt werden. Das Prinzipschaltbild des Versuchskreises ist in *Abbildung 4.4* dargestellt. Der Versuchskreis besteht im Wesentlichen aus 34 Kondensatoren<sup>66</sup> mit einer Kapazität

<sup>64</sup> Die im nachfolgend dargestellten Oszillogramme sind teilweise an MO-Varistoren unterschiedlicher Hersteller und Geometrien aufgenommen worden. Aus diesem Grund können die Amplituden der Strom- und Spannungsverläufe nicht direkt miteinander verglichen werden.

<sup>65</sup> Nach [IEC60099-4] ist ein Rechteckimpuls ein „Stoßstrom, der rasch auf einen Höchstwert ansteigt, auf diesem Wert über eine vorgegebene Zeitdauer im Wesentlichen konstant bleibt und dann rasch auf null abfällt“. Die Scheiteldauer ist definiert als die „Zeitspanne, während der die Amplitude des Stoßes größer als 90 % des Scheitelwertes ist“.

<sup>66</sup> Der Rechteckimpulsgenerator wurde im Laufe der Untersuchungen von 20 Stufen auf 34 Stufen erweitert, was notwendig wurde, um die mechanische Ausfallenergie von MO-Varistoren der Hochspannungsebene durch einen einzigen Energieeintrag bestimmen zu können. Der Deutschen Forschungsgemeinschaft sei an dieser Stelle für die finanzielle Unterstützung gedankt.



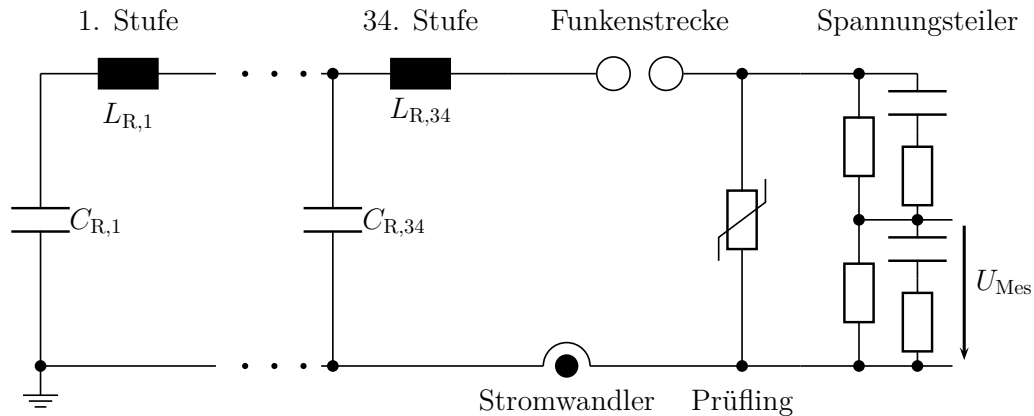
**Abbildung 4.3:** Oszillogramm von Spannung und Strom bei einer Belastung eines MO-Varistors mittels des Wechselstromprüfsystems bis zum mechanischen Ausfall

von jeweils  $10\text{ }\mu\text{F}$  und einer Nennspannung von mindestens  $40\text{ kV}$ , sowie 34 Spulen mit verschiedenen Abgriffen, die zu Induktivitäten von  $250\text{ mH}$  bis  $3920\text{ mH}$  führen.

Nach dem Laden der Kondensatoren auf die gewählte Ladespannung kann der Rechteckimpuls durch Ansteuern der Funkenstrecke ausgelöst werden. Die Funkenstrecke wurde im Laufe der Untersuchungen durch einen Halbleiterschalter bestehend aus seriellen Thyristoren ersetzt. Dieser ermöglicht eine ladespannungsunabhängige Auslösung und unterdrückt ein mögliches Durchschwingen des Stromes nach dem primären Rechteckimpuls. Der in den MO-Varistor eingeprägte Strom wird mit Hilfe eines Rogowskistromwandlers und die an dem MO-Varistor abfallende Spannung mit Hilfe eines Universalspannungsteilers gemessen und von einem Digitalen-Speicher-Oszilloskop erfasst. Die Daten werden an einen PC übertragen, der diese automatisiert mit einem LabVIEW-Programm auswertet und dokumentiert.

Ein beispielhaftes Oszillogramm von Strom und Spannung bei der Belastung eines MO-Varistors mit einem Rechteckimpuls ist in *Abbildung 4.5* dargestellt. Das Oszillogramm zeigt den schnell ansteigenden Stromverlauf, der für einen Zeitbereich von etwa  $1,9\text{ ms}$  näherungsweise konstant bleibt und im Anschluss daran schnell wieder auf Null absinkt.

#### 4 Verwendete Versuchseinrichtungen



**Abbildung 4.4:** Prinzipschaltbild des Rechteckimpulsgenerators.  $U_{\text{Mes}}$  ist die Spannung, die an das Oszilloskop übertragen wird.

Der für diese Impulsform charakteristische Spannungsverlauf<sup>67</sup> zeigt einen Anstieg während der Belastung, der vermutlich dem Temperaturanstieg im MO-Varistor (siehe Kapitel 5.2.1) geschuldet ist.

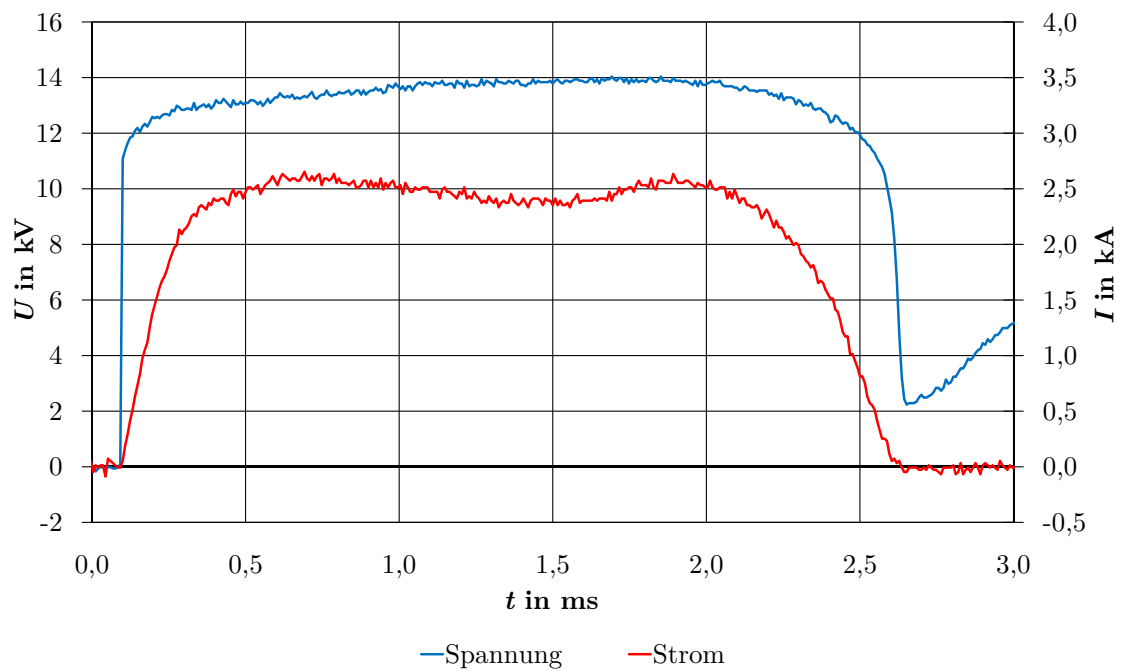
Für lange Rechteckimpulse werden alle 34 Stufen seriell betrieben, für kurze Belastungen, bzw. auch für Doppelimpulse, wird der Rechteckimpulsgenerator auf zwei parallele Generatoren aufgeteilt (das Prinzipschaltbild ist in Abbildung A.4 dargestellt). Neben den Rechteckimpulsen werden durch diesen Versuchskreis auch Doppel-exponentialstoßströme<sup>68</sup> der Form 90/200  $\mu\text{s}$  erzeugt. Für diese Belastung werden 20 Kondensatoren parallel geschaltet und die Stromform mit Hilfe einer zentralen Induktivität von 24  $\mu\text{H}$  geformt.

Ein beispielhaftes Oszillogramm von Strom und Spannung bei der Belastung eines MO-Varistors mit einem Doppel-exponentialstoßstrom der Form 90/200  $\mu\text{s}$  ist in *Abbildung 4.6* dargestellt. Der Energieeintrag liegt im Bereich des Einzelimpulsenergieaufnahmevermögens des belasteten MO-Varistors und führt folglich zu einer starken Erwärmung desselben. Im Oszillogramm liegt das Strommaximum zeitlich vor dem Spannungsmaximum, was vermutlich auf die Temperaturabhängigkeit der  $UI$ -Kennlinie des MO-Varistors zurückzuführen ist (siehe Kapitel 5.2).

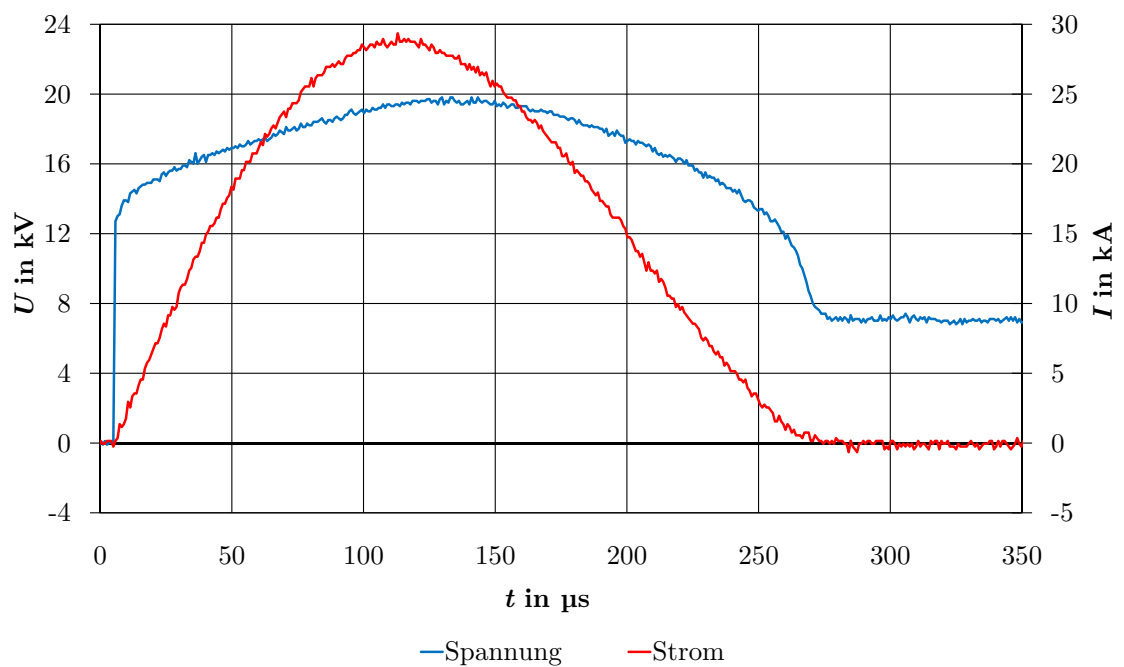
Weitere Angaben zu diesem Versuchskreis finden sich in Kapitel A.2.

<sup>67</sup> Die Schwankung des Stromverlaufs spiegelt sich durch die Nichtlinearität der  $UI$ -Kennlinie im belasteten Bereich nur in einem deutlich geringeren Verhältnis im Spannungsverlauf wieder.

<sup>68</sup> Dieser Stoßstrom lehnt sich an den in Annex N der [IEC60099-4] beschriebenen Doppel-exponentialstoßstrom, der für eine Dauer von 200  $\mu\text{s}$  bis 230  $\mu\text{s}$  größer als 5 % des Stromspitzenwerts sein soll, an.



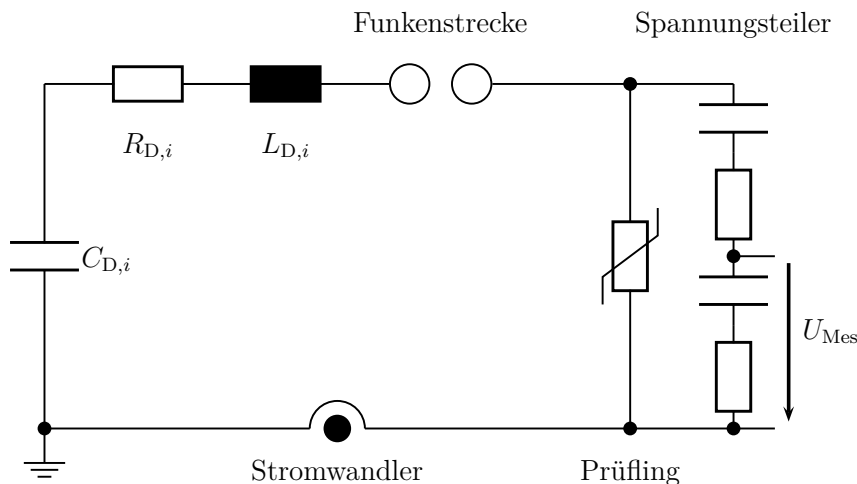
**Abbildung 4.5:** Oszillogramm von Spannung und Strom bei einer Belastung eines MO-Varistors mittels des Rechteckimpulsgenerators



**Abbildung 4.6:** Oszillogramm von Spannung und Strom bei einer Belastung eines MO-Varistors mit einem Doppel exponentialstoßstrom der Form 90/200  $\mu$ s

## 4.4 Doppel exponentialstoßstromgenerator

Am Doppel exponentialstoßstromgenerator werden zum einen die Doppel exponentialstoßströme<sup>69</sup> zur Bestimmung der  $UI$ -Kennlinie im Hochstrombereich und zum anderen die Doppel exponentialenergieeinträge der Form  $4/10\text{ }\mu\text{s}$  durchgeführt. Der Generator, dessen Prinzipschaltbild für einen Zweig *Abbildung 4.7* zu entnehmen ist, besteht aus bis zu acht parallelen Zweigen. Einer dieser Zweige besteht aus jeweils einem Kondensator mit einer Kapazität von  $2\text{ }\mu\text{F}$  und einer Nennspannung von  $100\text{ kV}$  sowie einer Induktivitäts-Widerstandskombination (deren technische Daten finden sich in *Tabelle A.10*) zur Einstellung der Impulsform.



**Abbildung 4.7:** Prinzipschaltbild des Doppel exponentialstoßstromgenerators.  $U_{\text{Mes}}$  ist die Spannung, die an das Oszilloskop übertragen wird.

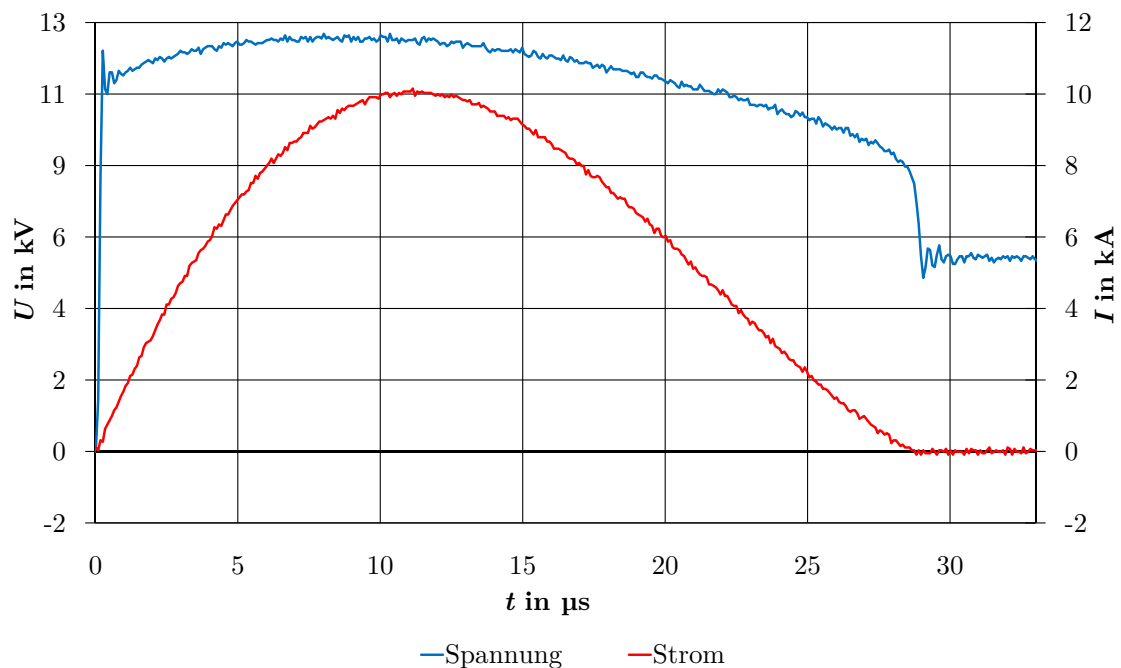
Der durch den Prüfling fließende Strom wird mit Hilfe eines induktiven Stromwandlers und die an dem Prüfling abfallende Spannung<sup>70</sup> mit Hilfe eines gedämpft-kapazitiven Spannungsteilers gemessen und von dem selben Oszilloskop wie dem des Rechteckimpulsgenerators erfasst und dementsprechend an einem PC ausgewertet und dokumentiert.

Ein Beispieloszillogramm eines ungefilterten Blitzstoßstromes der Form  $8/20\text{ }\mu\text{s}$  ist *Abbildung 4.8* und das eines Hochstoßstromes der Form  $4/10\text{ }\mu\text{s}$  der *Abbildung 4.9* zu entnehmen. Es ist zu erkennen, dass der doppel exponentialstromverlauf auf Grund der nichtlinearen  $UI$ -Kennlinie eine nicht doppel exponential Spannungsförmigkeit an dem geprüften MO-Varistor abfallen lässt. Weiterhin erreicht bei dem Blitzstoßstrom die Spannung ihren Spitzenwert vor dem des Stromes, obwohl die durch die Geometrie des Prüflings hervorgerufenen

<sup>69</sup> Die Kennwerte und Kriterien zur Bestimmung der Zeitparameter etc. sind in [IEC60099-4] festgelegt.

<sup>70</sup> Es ist zu beachten, dass die induktiven Anteile des Spannungsverlaufes durch eine Kompensationsspule kompensiert werden (siehe [Rei08] bzw. Kapitel A.3).

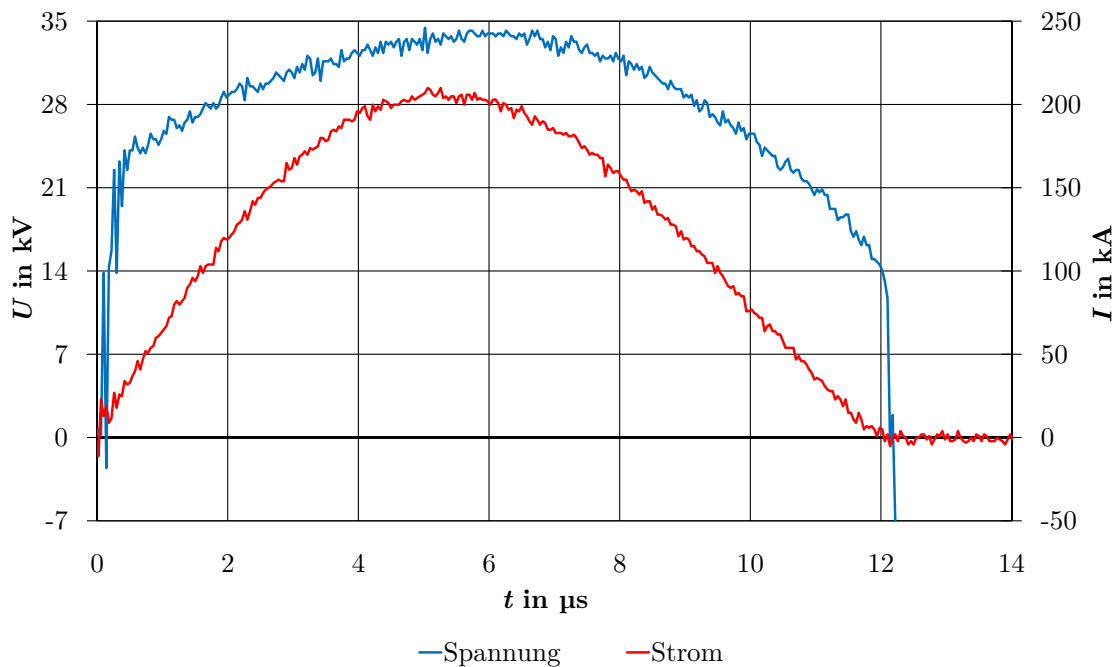
induktiven Anteile des Spannungsverlaufs kompensiert wurden<sup>71</sup>. Bei dem dargestellten Hochstoßstrom, dessen Energieinhalt im Bereich des Einzelimpulsenergieaufnahmevermögens des geprüften MO-Varistors liegt, ist der Spannungsverlauf deutlich stärker als bei der Blitzstoßstrombelastung gekrümmt und erreicht sein Maximum erst nach dem Strommaximum. Die deutlichere Krümmung lässt darauf schließen, dass der MO-Varistor in einem Bereich der  $UI$ -Kennlinie mit geringerem Nichtlinearitätsexponenten belastet wird. Die Verlagerung des Spannungsmaximums nach dem Strommaximum ist vermutlich auf die Temperaturabhängigkeit der  $UI$ -Kennlinie zurückzuführen. Wie in *Abbildung A.8* zu erkennen ist, liegt bei geringerem Stromscheitelwert an einem anderen belasteten MO-Varistor (größeren Durchmessers) das Spannungsmaximum vor dem Strommaximum. Dieses Verhalten wird in Kapitel 5.2 vertieft diskutiert.



**Abbildung 4.8:** Oszillogramm von Spannung und Strom bei einer Belastung eines MO-Varistors mit einem Doppelsexponentialstoßstrom der Form 8/20 µs

Für Belastungen mit Hochstoßströmen der Form 4/10 µs werden wegen des hohen Energieeintrags die belasteten MO-Varistoren thermisch isoliert (mit Hilfe des erwähnten Fibersilikats) mit einer zentrierten Stromdurchführung thermisch von der Einspannvorrichtung entkoppelt. Zwischen thermischer Isolierung und Prüfling wird beidseitig jeweils eine Kontaktelektrode aus Aluminium (siehe Kapitel 4.1) verwendet.

<sup>71</sup> Nach [Sch94] ist dies durch den im Hochstrombereich vorherrschenden Protonen-Leitungsmechanismus begründet.



**Abbildung 4.9:** Oszillogramm von Spannung und Strom bei einer Belastung eines MO-Varistors mit einem Doppelsexponentialstoßstrom der Form 4/10 µs

Für die Charakterisierung der MO-Varistoren im Hochstrombereich der  $UI$ -Kennlinie werden die Prüflinge unter Verwendung eines rotierenden Magazins geprüft, das in *Abbildung 4.10* dargestellt ist. Die Einspannvorrichtung wird in diesem Fall ohne thermische Isolierung eingesetzt, da der Energieinhalt der Charakterisierungsstoßströme vergleichsweise gering ist und zu keiner deutlichen Erwärmung der Prüflinge führt. Oberhalb und unterhalb der Prüflinge werden Kontaktelektroden aus Aluminium (siehe Kapitel 4.1) verwendet.

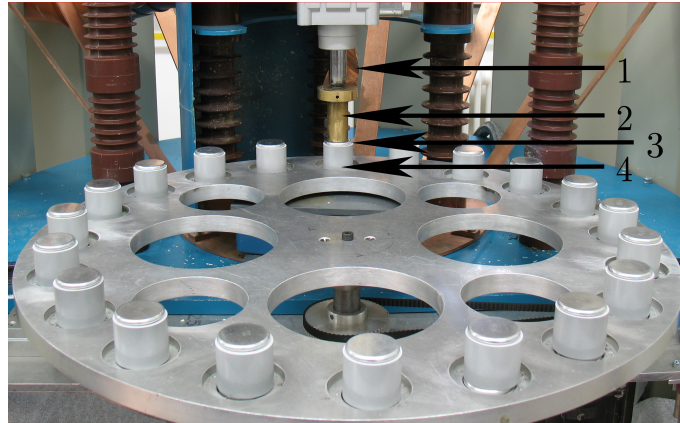
Weitere Angaben zu diesem Versuchskreis finden sich in Kapitel A.3.

## 4.5 Referenzspannungsmesssystem

Das Referenzspannungsmesssystem wird zur Bestimmung der „charakteristischen Spannung“<sup>72</sup> (als  $\frac{\hat{U}}{\sqrt{2}}$ ) bei einem Scheitelwert der Stromdichte von zumeist 0,12 mA/cm<sup>2</sup> eingesetzt. Das Prinzipschaltbild des Messsystems ist *Abbildung 4.11* zu entnehmen. Die

<sup>72</sup> Diese liegt im Bereich typischer Referenzspannungen von Überspannungsableitern. Da jedoch die Stromdichte zur Messung der Referenzspannung in [IEC60099-4] nicht definiert ist, sondern sich zwischen den Herstellern unterscheidet, wird hier (wie in anderen Veröffentlichungen) der Begriff der „charakteristischen Spannung“ verwendet.





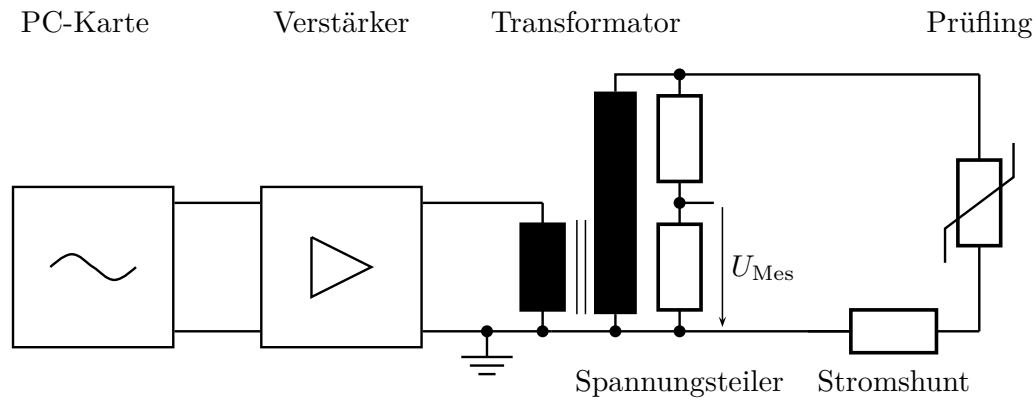
**Abbildung 4.10:** Einspannvorrichtung des Doppel exponentialstoßstromkreises für die Charakterisierung im Hochstrombereich (1 Prüfstromzuführung, 2 Krafteinleitung von Druckluftzylinder, 3 Aluminiumelektrode, 4 Prüfling)

Prüfspannung wird von einer PC-Messkarte erzeugt, von einem Leistungsverstärker verstärkt und von einem Hochspannungstransformator hochtransformiert. Die Spannung am Prüfling wird mit Hilfe eines ohmschen Spannungsteilers und der Strom mit Hilfe eines ohmschen Shunts gemessen, von einer PC-Messkarte erfasst und von einem LabVIEW-Programm automatisiert ausgewertet und dokumentiert. Es wird der betragsgrößere Wert des Stromscheitelwertes von positiver oder negativer Amplitude detektiert und in der gleichen Halbwelle das Spannungsmaximum ausgewertet. Durch die Erzeugung des Signals an der PC-Messkarte ist ein automatisiertes Einregeln der Stromhöhe (bzw. der Spannungshöhe) möglich und ferner ein Bestimmen der Messgrößen zum immer gleichen Zeitpunkt (für die hier beschriebenen Untersuchungen 5 s nach Anlegen der Spannung), was die Reproduzierbarkeit erhöht. Durch das Prinzip der Bereitstellung der Prüfspannung von einem Leistungsverstärker, können Spannungen definierter Frequenz mit einem geringen Oberwellenanteil sichergestellt werden, was für die Bestimmung der Größen in diesem Bereich der *UI*-Kennlinie große Bedeutung hat.

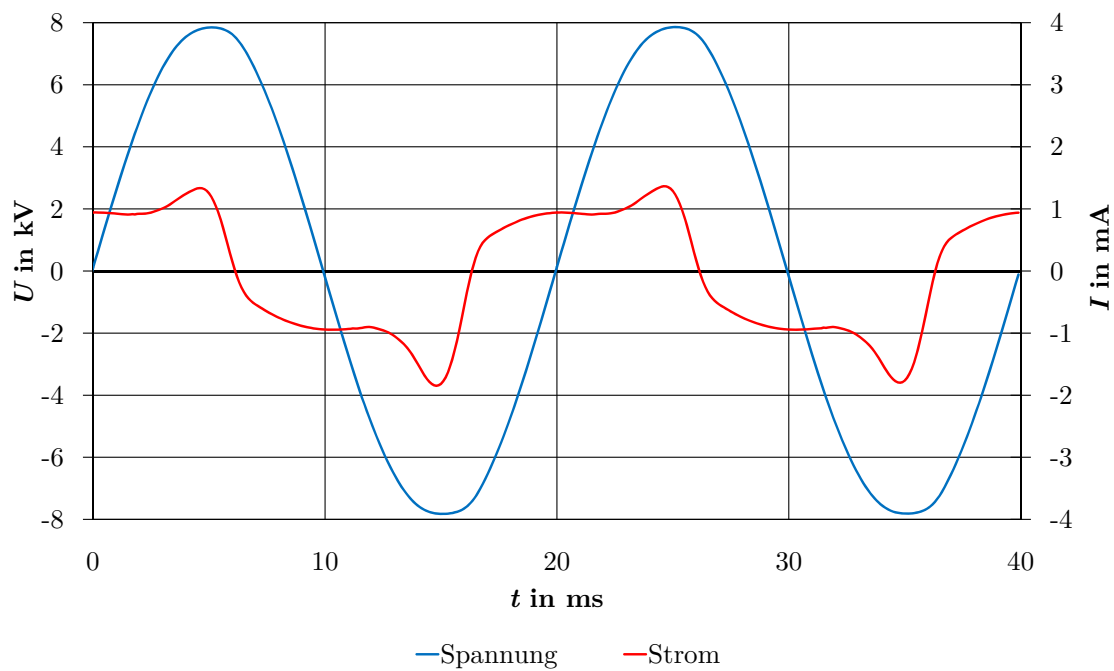
Ein beispielhafter, ungefilterter Spannungs- und Stromverlauf im Bereich der später betrachteten Stromdichten ist in *Abbildung 4.12* dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Spannungsform trotz der Belastung einem idealen Sinus noch sehr nahe kommt<sup>73</sup>. Der Strom weist eine deutliche kapazitive Komponente auf, der in diesem Fall aufgrund der Vorbelastung eine asymmetrische, resistive Komponente überlagert ist.

<sup>73</sup> Nach [IEC60099-4] darf das Verhältnis von Scheitelwert zum Effektivwert um nicht mehr als 2 % von  $\sqrt{2}$  abweichen. In [IEC60060-1] sind für betriebsfrequente Wechselspannungen lediglich 5 % gefordert, was bei der stark nichtlinearen *UI*-Kennlinie der MO-Varistoren jedoch nicht zu reproduzierbaren Ergebnissen führt. Aus diesem Grund wird der Grenzwert von 2 % verwendet, der während keiner der nachfolgend dargestellten Messungen überschritten wurde.

#### 4 Verwendete Versuchseinrichtungen



**Abbildung 4.11:** Prinzipschaltbild des Referenzspannungsmesssystems.  $U_{\text{Mes}}$  ist die Spannung, die an die PC-Messkarte übertragen wird.



**Abbildung 4.12:** Oszillogramm von Spannung und Strom im Vordurchbruchbereich der  $UI$ -Kennlinie an einem MO-Varistor

Die Prüflinge werden in einer pneumatischen Einspannvorrichtung bei einer Einspannkraft von 314 N vermessen. Die Umgebungstemperatur wird erfasst und dokumentiert<sup>74</sup>.

Weitere Angaben zu diesem Versuchskreis finden sich in Kapitel A.4.

## 4.6 Alterungsprüfsystem

Im Alterungsprüfsystem<sup>75</sup> werden Prüflinge bei erhöhter Temperatur mit Wechselspannung über lange Zeiträume (z. B. 1000 h) belastet. Es stehen drei Temperaturschränke zur Verfügung, in denen je bis zu fünf Prüflinge bei Temperaturen bis 200 °C an Spannungen bis 10 kV betrieben werden können. Das Prinzipschaltbild gleicht dem in Abbildung 4.11 dargestellten, mit der Ausnahme, dass im Alterungsprüfsystem mehr als ein Prüfling gleichzeitig von der zentralen Spannungsversorgung belastet werden kann. Die Spannungsform wird von einer PC-Messkarte erzeugt, von einem Leistungsverstärker verstärkt und von einem Hochspannungstransformator hochtransformiert. Die an den Prüflingen abfallende Spannung wird mit Hilfe eines zentralen ohmschen Spannungsteilers, der durch jeden einzelnen Prüfling fließende Strom jeweils mit Hilfe eines Stromshunt gemessen, von einer PC-Messkarte erfasst und von einem LabVIEW-Programm ausgewertet und dokumentiert. Die Verlustleistung wird über drei Perioden gemittelt und zu Beginn des Versuchs zweimal pro Minute und am Ende der Messung (wegen des wesentlich geringeren Gradienten) nur noch alle fünf Minuten erfasst. Dieses Programm übernimmt auch die Regelung der zentralen Prüfspannung und der Temperatur in den einzelnen Temperaturschränken. Die Temperatur der einzelnen Prüflinge wird mit einem Temperatursensor in der erdseitigen Kontaktelektrode aus Aluminium überwacht. Diese Temperatur dient als Regelgröße.

In *Abbildung 4.13* ist der Verlustleistungsverlauf an einem MO-Varistor, der für 1000 h bei 115 °C an einer Spannung (im Bereich von typischen Dauerspannungen) in dem Alterungsprüfsystem gelagert wurde, dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sowohl Spannung als auch Temperatur vom Prüfsystem sehr konstant gehalten werden<sup>76</sup> und die Verlustleistung des MO-Varistors während der gesamten Prüfdauer kontinuierlich abnimmt.

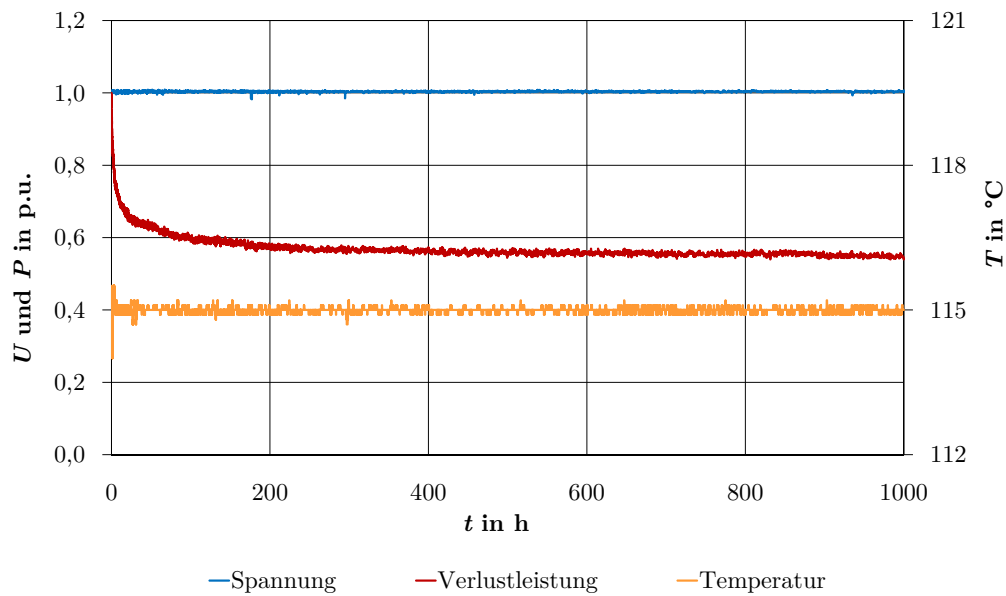
Die Innenansicht eines Temperaturschranks mit einem eingesetzten MO-Varistor ist *Abbildung 4.14* zu entnehmen. Der MO-Varistor ist zwischen zwei Kontaktelektroden aus

<sup>74</sup> Wie [Rei08] zeigt, ist der zu erwartende Fehler im betrachteten Strombereich bei einer Schwankung der Umgebungstemperatur von 20 °C bis 30 °C kleiner als 1,5 %.

<sup>75</sup> Dieses Prüfsystem wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelt und aufgebaut (siehe [Tsc11]).

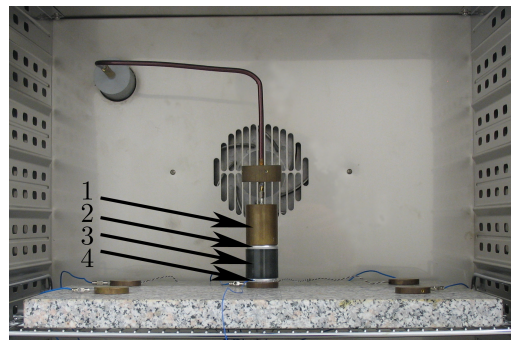
<sup>76</sup> Nach [IEC60099-4] darf sich die Spannung um nicht mehr als 1 % ändern und die Temperatur um nicht mehr als  $\pm 1$  K. Weiterhin darf der Wert des Verhältnisses vom Scheitel- zum Effektivwert von  $\sqrt{2}$  um nicht mehr als 2 % abweichen. Dies wurde während der gesamten Prüfdauer überwacht und eine größere Abweichung als 2 % trat in keiner der dargestellten Untersuchungen auf.

#### 4 Verwendete Versuchseinrichtungen



**Abbildung 4.13:** Aufzeichnung von Spannung, Verlustleistung und Temperatur an einem MO-Varistor im Alterungsprüfsystem, wobei Verlustleistung und Spannung auf den Anfangswert normiert dargestellt sind

Aluminium durch die Gewichtskraft des oberen Messingkontakts fixiert. In der unteren Kontaktelektrode aus Aluminium ist der Temperatursensor integriert. Die untere Elektrode ist isoliert aufgestellt, um im Erdfeld (außerhalb des Temperaturschranks) den Stromverlauf mittels eines Shunts messen zu können.



**Abbildung 4.14:** Innenansicht eines der drei Temperaturschränke im Alterungsprüfsystem (1 Messingkontakt, 2 obere Aluminiumelektrode, 3 Prüfling, 4 Temperatursensor in unterer Aluminiumelektrode)

Weitere Angaben zu diesem Versuchskreis finden sich in Kapitel A.5.

## 5 Impulsbelastbarkeit von MO-Varistoren

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen vorgestellt und interpretiert. Im ersten Teil werden die Untersuchungen zum Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen<sup>77</sup> vorgestellt, die zum Großteil in [Rei08] veröffentlicht sind und hier durch weitere Untersuchungen ergänzt werden. Die Ergebnisse dienen als Referenz für die späteren Untersuchungen zur Mehrfachbelastbarkeit.

Das Einzel- unterscheidet sich vom Mehrfachimpulsenergieaufnahmevermögen, wie in Kapitel 5.4 dargestellt. Vorangegangene Impulse rufen zum einen mikro- und makroskopische Veränderungen im MO-Varistor hervor, und zum anderen erhöhen sie die Temperatur im MO-Varistor. Um diese Effekte zu trennen, werden im Kapitel 5.2 Untersuchungen zum Einfluss der Temperatur auf das Energieaufnahmevermögen von MO-Varistoren vorgestellt. Im darauffolgenden Abschnitt wird das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen mit dem Energieaufnahmevermögen bei zwei kurz aufeinanderfolgenden ( $< 3$  s) Rechteckimpulsbelastungen verglichen.

Den Schwerpunkt der Arbeit bilden die Untersuchungen zur repetierenden<sup>78</sup> Belastbarkeit, bei der systematisch der Unterschied zwischen verschiedenen Belastungsarten (Stromdichten der Belastung) von dem Einfluss der Energiedichte der einzelnen Belastungen getrennt werden kann. Da diese Untersuchungen besondere Relevanz auch für Stückprüfungen im Anschluss an den Herstellungsprozess von MO-Varistoren haben, wird in Kapitel 5.4.4 ein herkömmliches mit einem vorgeschlagenen neuen Stückprüfverfahren verglichen.

Zum Abschluss werden in Kapitel 5.5 Untersuchungen zum Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen nach Vorbeanspruchungen vorgestellt. Wegen der hohen praktischen Relevanz werden hier zum einen Untersuchungen vorgestellt, die den Einfluss von Änderungen der  $UI$ -Kennlinien auf das Energieaufnahmevermögen bestimmen, und zum anderen Untersuchungen zum Energieaufnahmevermögen von MO-Varistoren, die über mehrere Jahre in realen Überspannungsableitern im elektrischen Energieversorgungsnetz betrieben wurden.

---

<sup>77</sup> Die unterschiedlichen Arten des Energieaufnahmevermögen sind in Kapitel 2.3 gegenübergestellt.

<sup>78</sup> Zwischen den Belastungen werden die Prüflinge auf Umgebungstemperatur abgekühlt.

Einen Überblick über die Zielsetzungen der nachfolgend beschriebenen Untersuchungen bietet *Tabelle 5.1*.

Für alle Untersuchungen (mit Ausnahme der Untersuchungen in Kapitel 5.5.3) werden fabrikneue MO-Varistoren verwendet. Diese waren, bis auf die Stückprüfung<sup>79</sup> am Ende des Herstellungsprozesses, keinen elektrischen Belastungen ausgesetzt. Zur Vermeidung von Oberflächenverschmutzungen werden die MO-Varistoren stets nur mit weißen Baumwollhandschuhen berührt.

Die MO-Varistoren wurden von verschiedenen internationalen Herstellern unter der Auflage zur Verfügung gestellt, dass die Untersuchungsergebnisse anonymisiert veröffentlicht werden. Aus diesem Grund werden neutrale Bezeichnungen für die verschiedenen Varistorkeramiken, Varistortypen von verschiedenen Herstellern verwendet und in fotografischen Darstellungen die Glasur blau eingefärbt. Jede Bezeichnung steht für eine Gruppe von MO-Varistoren gleichen Typs eines Herstellers aus einem Produktionslos<sup>80</sup>. Auf ausdrücklichen Wunsch der Hersteller werden in jedem Abschnitt neue Symbole eingeführt, um eine Entschlüsselung zu erschweren. Zwischen den in den unterschiedlichen Abschnitten verwendeten Bezeichnungen S bis Z (der Größe 1 und 2), Keramik 1 und 2, I bis III,  $\alpha$  bis  $\gamma$ , Typ 1 und 2 sowie Ü1 bis Ü9 besteht keine direkte Beziehung. Teilweise handelt es sich in den unterschiedlichen Abschnitten um MO-Varistoren des gleichen Produktionsloses, die aus den zuvor genannten Gründen nicht gleich bezeichnet sind. Ergeben sich aus Querbeziehungen zwischen den unterschiedlichen Untersuchungen neue, über die aus den einzelnen Untersuchungen hinausgehende Erkenntnisse, so sind diese explizit beschrieben. Innerhalb eines Abschnittes werden keine zwei gleichen MO-Varistortypen eines Herstellers unterschiedlicher Produktionslose unterschiedlich bezeichnet. Die unterschiedlich bezeichneten Produktionslose unterscheiden sich im Regelfall durch den Hersteller der MO-Varistoren. In Ausnahmefällen werden unterschiedliche MO-Varistortypen (bei denen sich nicht nur die geometrische Dimension, sondern auch die Rezeptur unterscheidet) eines Herstellers unterschieden.

Es werden zwei Größen von MO-Varistoren untersucht:

**Größe 1:** Die MO-Varistoren der „Größe 1“ haben einen Durchmesser von 55 mm bis 65 mm und eine Höhe<sup>81</sup> von 40 mm bis 45 mm. Diese MO-Varistorgröße wird

<sup>79</sup> Es ist davon auszugehen, dass die verwendeten MO-Varistoren denen gleichen, die die jeweiligen Hersteller für die Produktion ihrer Überspannungsableiter verwenden. Da ein verdeckter Einkauf von MO-Varistoren im benötigten Umfang nicht möglich war, ist jedoch nicht ausgeschlossen (wenn auch nicht zu vermuten), dass die jeweiligen Hersteller im Produktionsprozess der zur Verfügung gestellten MO-Varistoren spezielle Rezepturen oder Stückprüfungen verwendet haben.

<sup>80</sup> Eine Ausnahme bilden die Bezeichnungen in Kapitel 5.1. In diesem werden die Bezeichnungen aus den Untersuchungen von [Rei08] fortgeführt und für jeden Hersteller eine Bezeichnung vergeben sowie die MO-Varistortypen anhand der „Größe“ unterschieden.

<sup>81</sup> Einer der Hersteller lieferte MO-Varistoren mit einer Höhe von nur 26 mm.

**Tabelle 5.1:** Übersicht über die im Folgenden vorgestellten Untersuchungen an MO-Varistoren

Kapitel	Ziel der Untersuchung
5.1	Abhängigkeit des <b>Einzelimpuls</b> energieaufnahmevermögens von der Stromdichte der Belastung
5.2.1	<b>Temperaturabhängigkeit der <i>UI</i>-Kennlinie</b> im Bereich von für Energieeinträge relevanten Stromdichten
5.2.2	Auswirkung der <b>Temperaturabhängigkeit der <i>UI</i>-Kennlinie</b> auf das <b>Einzelimpuls</b> energieaufnahmevermögen
5.2.3	Änderung des <b>Einzelimpuls</b> energieaufnahmevermögens durch eine <b>erhöhte Starttemperatur</b>
5.3	Abgrenzung von <b>Einzelimpuls-</b> zu <b>Mehrfachimpulsbelastbarkeit</b>
5.4.1	Bestimmung der Belastbarkeit mit <b>repetierenden Wechselstromenergieeinträgen</b>
5.4.2	Bestimmung der Belastbarkeit mit <b>repetierenden Rechteckimpulsen</b>
5.4.3	Vergleichende Untersuchungen zu der Belastbarkeit mit <b>repetierenden Energieeinträgen gleicher Energiedichte</b> jedoch unterschiedlicher Stromdichte Vergleich der Auswirkungen von <b>repetierenden</b> Vorbelastungen auf <b>Wechselstrom- und Rechteckimpulsenergieeinträge</b> Bestimmung der Belastbarkeit mit Rechteckimpulsen <b>alternierender Polarität</b>
5.4.4	Vergleich der Selektivität und des Vorschädigungsverhaltens einer <b>Stückprüfung</b> mit Rechteckimpulsen bzw. Wechselstromenergieeinträgen
5.5.1	Untersuchung der Korrelation zwischen der <b>Änderung der <i>UI</i>-Kennlinie</b> (durch eine Vorbelastungen) und der <b>Änderung des Einzelimpuls</b> energieaufnahmevermögens
5.5.2	Untersuchung der <b>Rückbildung von Änderungen der <i>UI</i>-Kennlinie</b> (nach einer Vorbelastung) durch anliegende Dauerspannung bei erhöhter Umgebungstemperatur
5.5.3	Bestimmung des <b>Einflusses von realen Belastungen</b> in elektrischen Energieversorgungsnetzen auf das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen

üblicherweise in Überspannungsableitern der Hochspannungsnetze mit Leitungsentladungsklasse 2 oder 3 (nach [IEC60099-4]) eingesetzt.

**Größe 2:** Die MO-Varistoren der „Größe 2“ haben einen Durchmesser von ca. 40 mm und eine Höhe von 30 mm bis 40 mm und werden üblicherweise in Überspannungsableitern der Mittelspannungsnetze mit 10 kA Nennableitstoßstrom eingesetzt.

### 5.1 Einzelimpulsbelastbarkeit von MO-Varistoren

Die im Nachfolgenden vorgestellten Ergebnisse zum Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen entstanden zu großen Teilen während der Untersuchungen von [Rei08]. Diese Untersuchungen wurden im Rahmen dieser Arbeit erweitert und ergänzt.

Zur Untersuchung des Einzelimpulsenergieaufnahmevermögens wurden über 3000 MO-Varistoren von sieben international etablierten Herstellern untersucht. Zur Anonymisierung der Ergebnisse werden jedem MO-Varistor-Hersteller ein kennzeichnender Buchstabe (S, T, U, V, W, X, Y und Z) zugeordnet. Lieferte ein Hersteller MO-Varistoren beider unterschiedenen Größen, wird bei beiden Größen der gleiche Buchstabe zugeordnet. In einem Fall lieferte ein Hersteller zwei verschiedene MO-Varistortypen (unterschiedlicher Rezeptur) der gleichen Größe. Für diese beiden Typen werden getrennte Buchstaben verwendet.

Bedingt durch Beschränkungen der Versuchsanlagen sowie auf Grund der praktischen Relevanz wird das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen an den MO-Varistoren der „Größe 1“ (siehe oben) bei Belastung mit drei unterschiedlichen Belastungsarten untersucht. Verwendet werden Wechselstromenergieeinträge bei einem Stromscheitelwert von 10 A, 100 A und 300 A, Rechteckimpulse mit einer Scheiteldauer von 1,2 ms, 1,9 ms und 3,9 ms sowie Belastung mit dem Doppel exponentialstoßstrom der Form 90/200  $\mu$ s. Die MO-Varistoren der „Größe 2“ hingegen werden mit Rechteckimpulsen mit einer Scheiteldauer von 1,2 ms, 1,9 ms und 3,9 ms oder Doppel exponentialstoßströme der Form 90/200  $\mu$ s bzw. 4/10  $\mu$ s belastet.

Für die Untersuchungen zum Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen bei Belastung mit Wechselstromenergieeinträgen werden diese bis zur mechanischen Zerstörung des jeweiligen Prüflings durchgeführt. Die Ergebnisse sind damit sehr gut vergleichbar mit denen vorangegangener Untersuchungen z. B. von [Rin97]. Die Einfachheit des Fehlerkriteriums „Belastung bis zur mechanischen Zerstörung“ hat den Nachteil, dass Ausfallmechanismen



nicht weiter differenziert werden können. Da gerade bei Belastungen mit hohen Stromdichten Kennlinienveränderungen und Vorschädigungen von MO-Varistoren auftreten können (wie Kapitel 2.2 und Kapitel 2.5 entnommen werden kann) wird für die Untersuchungen mit Rechteckimpulsen und Doppel exponentialstoßströmen ein „komplexes Fehlerkriterium“ gewählt, welches auch Vorschädigungen berücksichtigt. Das Ablaufdiagramm einer Prüfung eines MO-Varistors mit dem „komplexen Fehlerkriterium“ ist in *Abbildung 5.1* dargestellt.

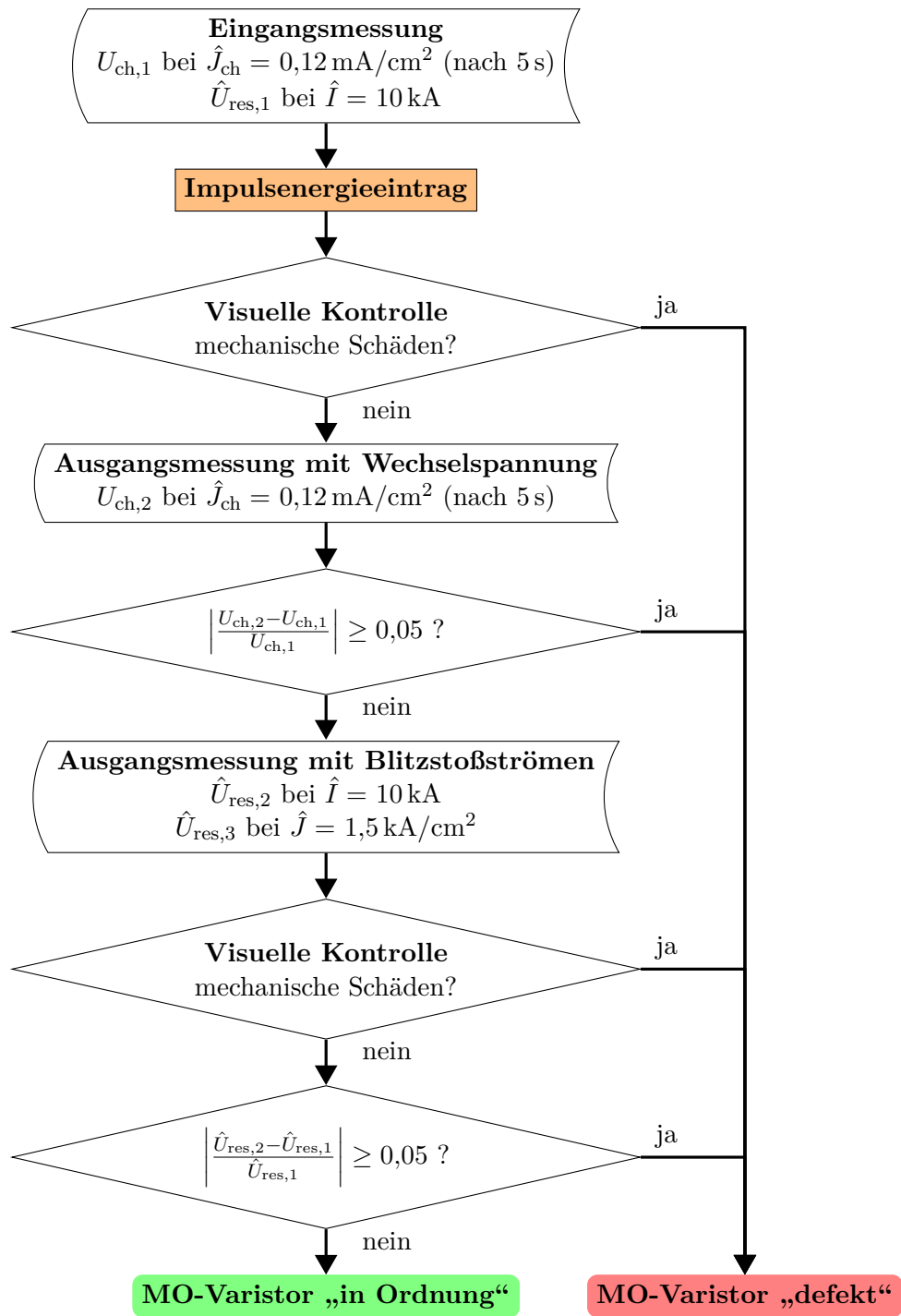
Zu Beginn der Untersuchungen wird an jedem MO-Varistor eine Eingangsmessung durchgeführt. Hierbei wird die „charakteristische Spannung“  $U_{ch}$ <sup>82</sup> bei einem Scheitelwert der Stromdichte von  $\hat{J}_{ch} = 0,12 \text{ mA/cm}^2$  ( $\pm 2\%$ ), nachdem die Spannung 5 s anlag, bestimmt. Weiterhin wird die Restspannung bei einem Blitzstoßstrom der Form  $8/20 \mu\text{s}$  bei einem Stromscheitelwert von  $10 \text{ kA}$  ( $\pm 1\%$ ) ermittelt.

Im Anschluss an die Eingangsmessung werden die Energieeinträge im Bereich um die mittlere Ausfallenergie der jeweiligen Energieeintragsart des MO-Varistortyps des untersuchten Herstellers durchgeführt. Dabei werden für jede Energieeintragsart (z. B. Impulslänge) 40 MO-Varistoren<sup>83</sup> eines MO-Varistortyps eines Produktionsloses untersucht. Innerhalb dieser Gruppe werden 5 bis 20 (sehr häufig 10) MO-Varistoren mit gleicher Energiedichte belastet, um die Ausfallwahrscheinlichkeit bei dieser Energiedichte zu bestimmen.

Fällt der MO-Varistor während des Energieeintrags aus (was dem Oszillogramm des Stromes zu entnehmen ist), wird eine visuelle Kontrolle des MO-Varistors durchgeführt. Bei dieser wird zwischen mechanischem Bruch, Durchschlag sowie Überslag als Ausfallbild unterschieden. Ist der MO-Varistor nicht durch den Energieeintrag mechanisch ausgefallen, wird an dem auf Umgebungstemperatur abgekühlten MO-Varistor eine Ausgangsmessung durchgeführt, in der die „charakteristische Spannung“ sowie die Restspannung erneut vermessen werden. Außerdem wird der MO-Varistor mit einem zusätzlichen Doppel exponentialstoßstrom der Form  $8/20 \mu\text{s}$  mit einem Scheitelwert der Stromdichte von  $\hat{J} = 1,5 \text{ kA/cm}^2$  belastet, um Vorschädigungen eindeutiger klassifizieren zu können. [Rei08] definierte, dass ein Varistor als ausgefallen gilt, wenn er durch den Energieeintrag mechanisch zerstört wurde, sich die „charakteristische Spannung“ oder die Restspannung infolge des Energieeintrags um mindestens 5 % geändert hat oder er durch die Doppel exponentialstoßströme der Ausgangsmessung mechanisch ausgefallen ist. Diese Definition wird in dieser Arbeit für alle Untersuchungen mit „komplexem Fehlerkriterium“ übernommen.

<sup>82</sup> Diese liegt im Bereich typischer Referenzspannungen von Überspannungsableitern. Da jedoch die Stromdichte zur Messung der Referenzspannung in [IEC60099-4] nicht definiert ist, sondern sich zwischen den Herstellern unterscheidet, wird hier (wie in anderen Veröffentlichungen) der Begriff der „charakteristischen Spannung“ verwendet.

<sup>83</sup> Liefert diese Anzahl kein eindeutiges Ergebnis, wird die Gruppe auf bis zu 80 MO-Varistoren erweitert.



**Abbildung 5.1:** Ablaufdiagramm der Bestimmung des Einzelimpulsenergieaufnahmevermögens unter Berücksichtigung des „komplexen Fehlerkriteriums“ (nach [Rei08])

Tritt ein mechanischer Ausfall eines Prüflings während eines Energieeintrags ein, so entspricht die Kurvenform des Energieeintrags nur bis zu dem Ausfall der definierten Kurvenform. Die entstehende Verkürzung der Impulsdauer im Falle eines Ausfalls beträgt z. B. bei Rechteckimpulsen im Mittel etwa 10 %, da die Untersuchungen im engen Bereich um die mittlere Ausfallenergie durchgeführt werden. Aufgrund der begrenzten Abweichung und um die Bezeichnung ausfallunabhängig zu wählen, wird im Folgenden stets die prospektive Impulsform als Bezeichnung verwendet. Die Stromdichte des Energieeintrags stellt die weniger eingängige, jedoch physikalisch exaktere Beschreibung der Belastung dar, weshalb diese zu Auswertungszwecken (z. B. in Diagrammen) verwendet wird.

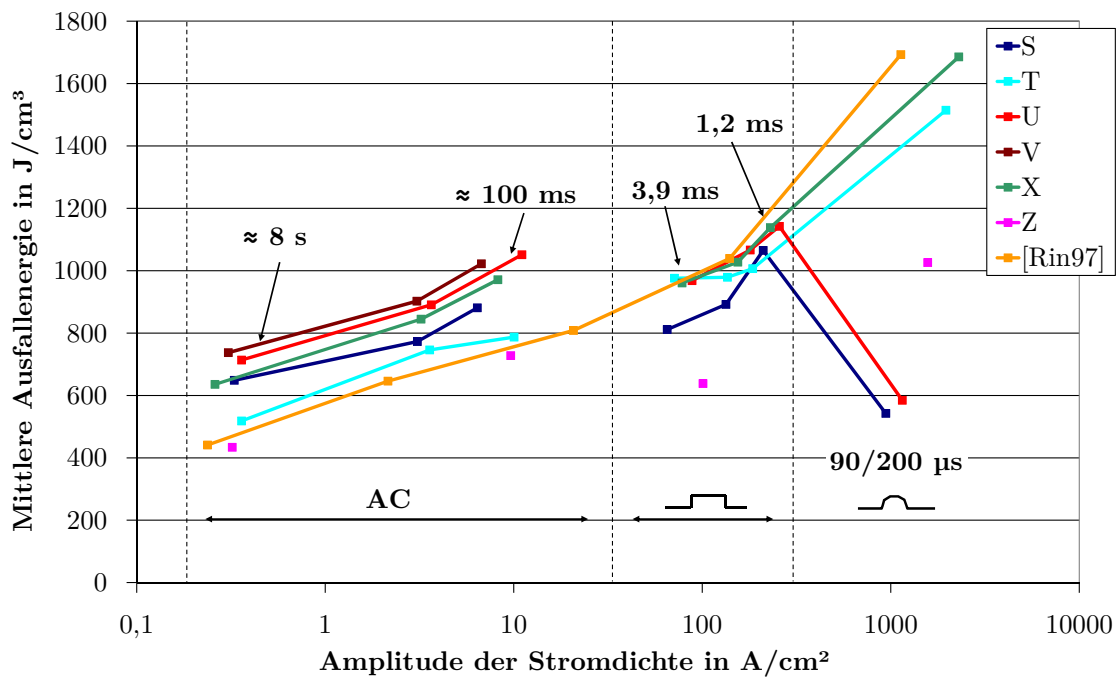
Die Versuchsergebnisse werden statistisch ausgewertet, wobei die mittleren Ausfallenergien bei zerstörenden Untersuchungen (Wechselstromenergieeinträge) mit der „Progressive Stress Method“ und die bei Untersuchungen mit „komplexem Fehlerkriterium“ (bei Verwendung der Impulsenergieeinträge) mit der „Multi Level Method“ ausgewertet werden. Die Verfahren zur statistischen Auswertung sind im Anhang in Kapitel B erläutert.

Die mittleren Ausfallenergien<sup>84</sup> über der Amplitude der Stromdichte, sowie Richtwerte für die Länge der Energieeinträge für die MO-Varistoren der „Größe 1“, sind in *Abbildung 5.2* dargestellt<sup>85</sup>. Jede Markierung im Diagramm wird durch Belastung von mindestens 40 MO-Varistoren eines Produktionsloses ermittelt. Für die Untersuchungen im Bereich von Stromscheitelwerten von etwa 0,3 A/cm<sup>2</sup> bis 10 A/cm<sup>2</sup> werden Wechselstromenergieeinträge verwendet. Hierbei werden die Prüflinge bis zur mechanischen Zerstörung belastet. Im Bereich von Stromscheitelwerten von etwa 60 A/cm<sup>2</sup> bis 300 A/cm<sup>2</sup> werden die MO-Varistoren mit Rechteckimpulsen belastet, im Bereich der größten untersuchten Stromdichten von bis zu 2500 A/cm<sup>2</sup> werden die MO-Varistoren mit dem Doppelexponentialstoßstrom der Form 90/200 µs belastet. Für diese Impulsenergieeinträge wird das „komplexe Fehlerkriterium“ angewandt, weshalb diese nicht direkt mit den zu Vergleichszwecken im Diagramm dargestellten Ergebnissen von [Rin97] vergleichbar<sup>86</sup> sind. [Rin97] belastete alle MO-Varistoren bis zur mechanischen Zerstörung, somit sind nur die Ergebnisse im Bereich der Wechselstromenergieeinträge direkt vergleichbar.

<sup>84</sup> Die Wechselstromenergieeinträge an „S“, „U“ und „X“ wurden von [Rei08] durchgeführt. Die Impulsbelastungen von „S“, „U“ und „X“ sowie die Wechselstromenergieeinträge von „Z“ wurden in Zusammenarbeit der beiden Autoren durchgeführt und sind in [Rei08] enthalten. Alle übrigen Untersuchungen (bis auf die mit [Rin97] gekennzeichneten) wurden vom Autor dieser Arbeit im Anschluss an die Untersuchungen von [Rei08] durchgeführt. Alle Untersuchungen sind in [Cig13] enthalten.

<sup>85</sup> Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die Standardabweichungen der einzelnen gemessenen Mittelwerte nicht dargestellt. Im Mittel ist die Standardabweichung kleiner als 10 % des Mittelwertes der Ausfallenergie.

<sup>86</sup> In *Abbildung 5.6* sind für ein Produktionslos die Auswirkungen der beiden Fehlerkriterien auf das ermittelte Energieaufnahmevermögen gegenübergestellt.



**Abbildung 5.2:** Mittlere Einzelimpulsausfallenergie über dem Scheitelwert der Stromdichte des Energieeintrags für die MO-Varistoren der „Größe 1“ (nach [Cig13])

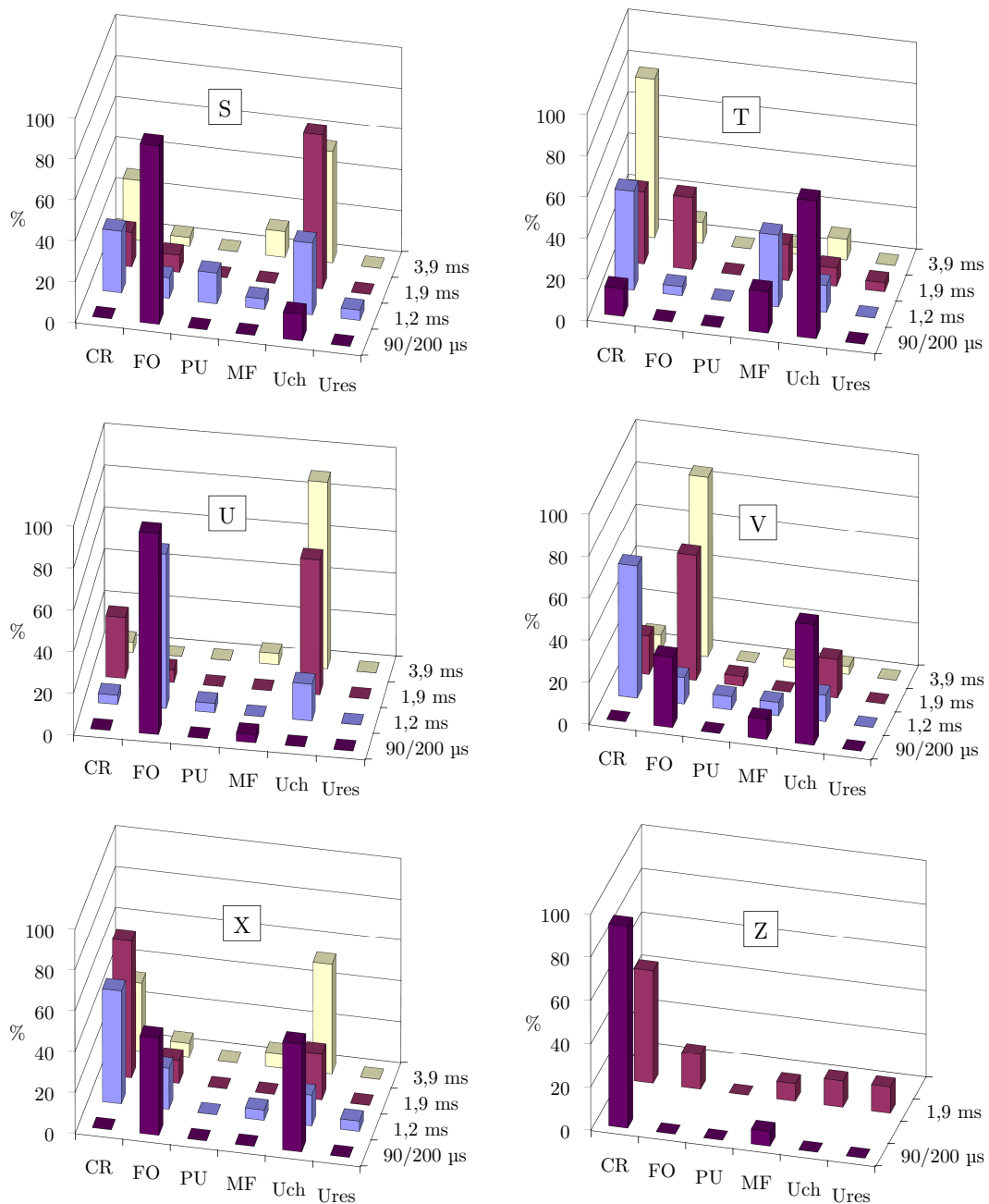
In *Abbildung 5.3* sind die Fehlermechanismen der untersuchten MO-Varistoren der „Größe 1“ für die verschiedenen Belastungsarten dargestellt. Dabei werden mit „CR“ Ausfallbilder bezeichnet, die zu einem Bruch des MO-Varistors führen, wie in *Abbildung: 2.8(a) bis (c), (e), (g) und (i)* dargestellt. Als „FO“ werden Überschlüge wie in *Abbildung: 2.8(f)* und als „PU“ Durchschläge, die nicht zu einem Reißen des MO-Varistors führen, wie in *Abbildung: 2.8(d)* dargestellt, bezeichnet. Als „100 %“ sind jeweils alle Ausfälle einer Energieeintragsart eines MO-Varistortyps eines Herstellers angenommen. Die nicht dargestellten Versuchsreihen (bei „Z“) sind nicht durchgeführt worden.

Als Ergebnis der Untersuchungen zum Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen lässt sich festhalten (wie größtenteils in [Cig13], [Hin09], [Tuc13a] und [Tuc09] veröffentlicht und in [Rei08] ausführlich diskutiert):

- Das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen steigt mit zunehmender Stromdichte von etwa  $400\text{ J/cm}^3$  bis  $1200\text{ J/cm}^3$  an<sup>87</sup>. Dabei zeigen die Ausfallbilder der mit hohen Stromdichten belasteten MO-Varistoren auf den Stirnflächen sehr viele Rückstände von lokalen thermischen Überlastungen, vermutlich beginnenden Durchschlägen. Die

<sup>87</sup> Es sei erneut darauf hingewiesen, dass diese Werte nicht mit dem thermischen Energieaufnahmevermögen von Standard-Überspannungsableitern (das nach [Hin12] üblicherweise im Bereich von  $200\text{ J/cm}^3$  bis  $300\text{ J/cm}^3$  liegt) verwechselt werden dürfen.

## 5.1 Einzelimpulsbelastbarkeit von MO-Varistoren



- CR** mechanischer Bruch (cracking).  
**FO** Übersschlag (flashover)  
**PU** Durchschlag durch den MO-Varistor (puncture)  
**MF** mechanischer Ausfall in der Ausgangsmessung (mechanical failure)  
**Uch** Änderung der „charakteristischen Spannung“ um mehr als 5 %  
**Ures** Änderung der Restspannung um mehr als 5 %

**Abbildung 5.3:** Fehlermechanismen der Impulsenergieeinträge unter Verwendung des „komplexen Fehlerkriteriums“ der MO-Varistoren der „Größe 1“ (nach [Cig13])

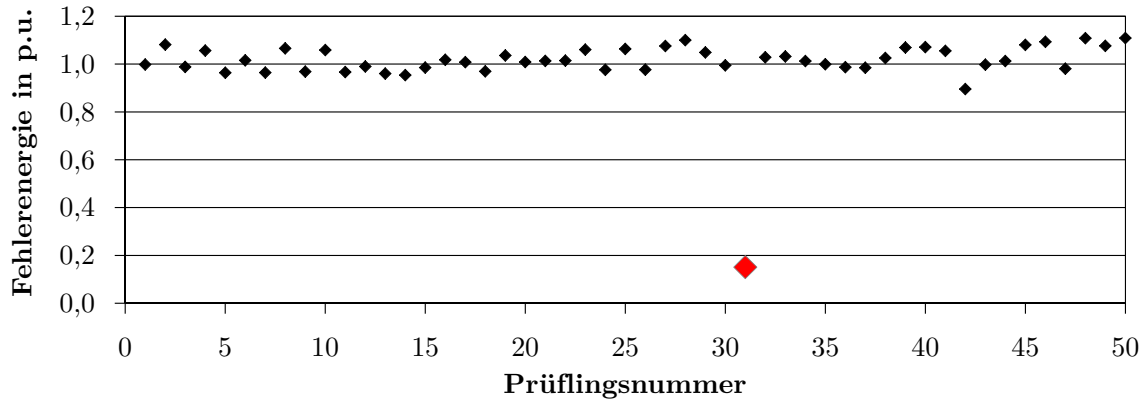
MO-Varistoren hingegen, die mit geringen Stromdichten belastet wurden, weisen im Regelfall nur einen einzigen Durchschlagkanal auf und keine zusätzlichen unvollständigen Schmelzkanäle. Diese Beobachtung scheint die Simulationsergebnisse von z. B. [Bar96b] zu bestätigen, wonach im MO-Varistor bei Belastungen mit hohen Stromdichten mehr parallele Strompfade genutzt werden als bei geringen Stromdichten, was das Energieaufnahmevermögen erhöht.

- Durch weitere Auswertungen konnte gezeigt werden, dass nicht nur die Energie, sondern auch die abführbare Ladung mit zunehmendem Stromscheitelwert des Energieeintrags zunimmt.
- Der Anstieg der mittleren Ausfallenergie bei sehr hohen Stromdichten wird nicht mehr durch die ZnO-Keramik, sondern z. B. durch die Durchschlagfestigkeit<sup>88</sup> der Glasur (wie bei Produktionslos „S“ und „U“) begrenzt. Es bleibt jedoch festzuhalten, dass auch in diesem Bereich das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen über dem üblichen thermischen Energieaufnahmevermögen liegt.
- Die Restspannung wird nur in sehr seltenen Fällen von einem Energieeintrag beeinflusst (wie bereits z. B. von [Dar97] festgestellt wurde), wohingegen die „charakteristische Spannung“ sensibler zu sein scheint.
- Das Energieaufnahmevermögen der untersuchten MO-Varistoren im Bereich der Wechselstromenergieeinträge liegt etwa 30 % höher als das der in [Rin97] untersuchten<sup>89</sup>. Dies ist möglicherweise auf die Weiterentwicklung der Produktionsprozesse zurückzuführen, die trotz des gestiegenen Kostendruckes zu einer Qualitätsverbesserung der MO-Varistoren geführt hat.

In [Rei08] wird weiterhin festgestellt, dass bei Prüfung des Einzelimpulsenergieaufnahmevermögens mit Wechselstromenergieeinträgen unter mehreren hundert Prüflingen, bei nahezu allen untersuchten Produktionslosen, ein oder mehrere MO-Varistoren (sogenannte Ausreißer) mit einem deutlich geringeren Energieaufnahmevermögen als bei den übrigen MO-Varistoren auftreten. In *Abbildung 5.4* ist beispielhaft eine Messreihe mit 50 MO-Varistoren dargestellt, bei der der MO-Varistor mit der Nummer 31 ein wesentlich geringeres Energieaufnahmevermögen aufweist als die übrigen geprüften MO-Varistoren. Möglicherweise können die aktuellen Verfahren der Stückprüfung der Hersteller Ausreißer bei dieser Belastungsart nicht zuverlässig detektieren.

<sup>88</sup> [Rei08] konnte nachweisen, dass der Durchschlag zwischen „MO-Varistor“ und Glasur erfolgt.

<sup>89</sup> Dass das Energieaufnahmevermögen im Bereich der Impulsenergieeinträge fast das Gleiche zu sein scheint, liegt an den unterschiedlichen Fehlerkriterien. Ein Vergleich der mittleren Ausfallenergien bei unterschiedlichen Fehlerkriterien ist in *Abbildung 5.6* dargestellt.



**Abbildung 5.4:** Übersicht über die normierten Ausfallenergien bei gleicher Belastung der MO-Varistoren eines Produktionsloses mit einem Wechselstromenergieeintrag (nach [Rei08])

Die Ausreißer können auf Inhomogenitäten oder Einschlüsse im MO-Varistor hinweisen, die sich bei verschiedenen Belastungsarten unterschiedlich auswirken können. In *Abbildung 5.5* sind die Ausfallenergien von jeweils 37 MO-Varistoren eines Produktionsloses dargestellt, bestimmt durch einen Energieeintrag bis zur mechanischen Zerstörung mit Wechselstrom (bei einer Stromdichte von  $0,35 \text{ A/cm}^2$  bzw.  $3,5 \text{ A/cm}^2$ ) bzw. einem Rechteckimpuls (bei einer Stromdichte von  $185 \text{ A/cm}^2$ ). Es wird deutlich, dass die Ausfallenergien für Wechselstromenergieeinträge bei einer Stromdichte von  $3,5 \text{ A/cm}^2$  stärker streuen als für Wechselstromenergieeinträge mit einer Stromdichte von  $0,35 \text{ A/cm}^2$  und Rechteckimpulsbelastungen mit einer Stromdichte von  $185 \text{ A/cm}^2$ . Bei einer Belastung der MO-Varistoren mit einer Stromdichte von  $3,5 \text{ A/cm}^2$  streuen die Ausfallenergien um zwei Energieniveaus, eines bei etwa 60 % und ein weiteres bei etwa 120 % der mittleren Ausfallenergie. Es ist zu vermuten, dass die MO-Varistoren, die bei dem niedrigeren Energieniveau ausfallen, Fehlstellen enthalten, die sich bei dieser Belastung besonders stark auswirken<sup>90</sup>. Möglicherweise konzentriert sich der belastende Stromfluss bei den Wechselstromenergieeinträgen bei einer Stromdichte von  $3,5 \text{ A/cm}^2$  am stärksten auf den Strompfad mit dem geringsten Widerstand<sup>91</sup>, bis dieser überlastet wird und ausfällt. Wenn dies zutrifft, lassen sich mechanische Fehlstellen mit dieser Belastungsart sensitiver als mit anderen Energieeintragsarten (Stromdichten, Zeitdauern des Energieeintrags) in MO-Varistoren erkennen.

Ein Vergleich des Einzelimpulsenergieaufnahmevermögens bei Anwendung der beiden unterschiedlichen Fehlerkriterien für Rechteckimpulsenergieeinträge ist für „T“ der „Größe 1“

<sup>90</sup> Dass sich bei höheren Stromdichten Fehlstellen nicht so stark auf das Energieaufnahmevermögen auswirken wie bei geringeren ist seit den Simulationsergebnissen in [Bar01] bekannt.

<sup>91</sup> Bei der Strompfadbildung spielt vermutlich die Dauer des Energieeintrags und die Wärmeleitfähigkeit der ZnO-Keramik eine Rolle.

im Vergleich zu den Untersuchungen von [Rin97] in *Abbildung 5.6* dargestellt. Wie aus *Abbildung 5.3* hervorgeht, fallen bei diesem Produktionslos die meisten MO-Varistoren während eines Energieeintrags mittels eines Rechteckimpulses mit einer Scheiteldauer von 3,9 ms und nicht während der Ausgangsmessung<sup>92</sup> aus. Der Anteil der MO-Varistoren, die während des Energieeintrags ausfallen, nimmt für dieses Produktionslos mit kürzer werdenden Energieeinträgen (höheren Stromdichten des Energieeintrags) ab. Dementsprechend nimmt die Differenz der mittleren Ausfallenergien zwischen den zwei untersuchten Fehlerkriterien mit zunehmender Stromdichte des Energieeintrags im betrachteten Bereich zu. Ab einer Stromdichte von etwa 250 A/cm<sup>2</sup> (bestimmt mit Rechteckimpulsen mit einer Scheiteldauer von etwa 1,2 ms) scheint das komplexe Fehlerkriterium zu einer etwa 20 % geringeren Ausfallenergie zu führen.

Anders wird es sich bei Produktionslosen verhalten, deren Energieaufnahmevermögen bei kurzen Energieeinträgen hauptsächlich durch mechanische Ausfälle und nicht durch Kennlinienveränderungen begrenzt wird. Ein Beispiel hierfür ist Produktionslos „U“ (siehe *Abbildung 5.3*) bei dem während längerer Rechteckimpulse mehr MO-Varistoren durch Kennlinienveränderungen ausfallen als bei kurzen Energieeinträgen (was vermutlich auf die Glasur zurückzuführen ist). In einem solchen Fall wird für kurze Energieeinträge nur eine geringe oder gar keine Differenz zwischen den mittleren Energieaufnahmevermögen bei Verwendung der unterschiedlichen Fehlermechanismen bestehen. Aus diesem Beispiel wird ersichtlich, dass kein genereller Zusammenhang zwischen der Ausfallenergie mit „komplexem Fehlerkriterium“ und Ausfallenergie bei Belastung bis zur mechanischen Zerstörung besteht. Soll eine Ausfallenergie aus der anderen abgeschätzt werden, müssen die Ausfallursachen in die Betrachtung mit einbezogen werden.

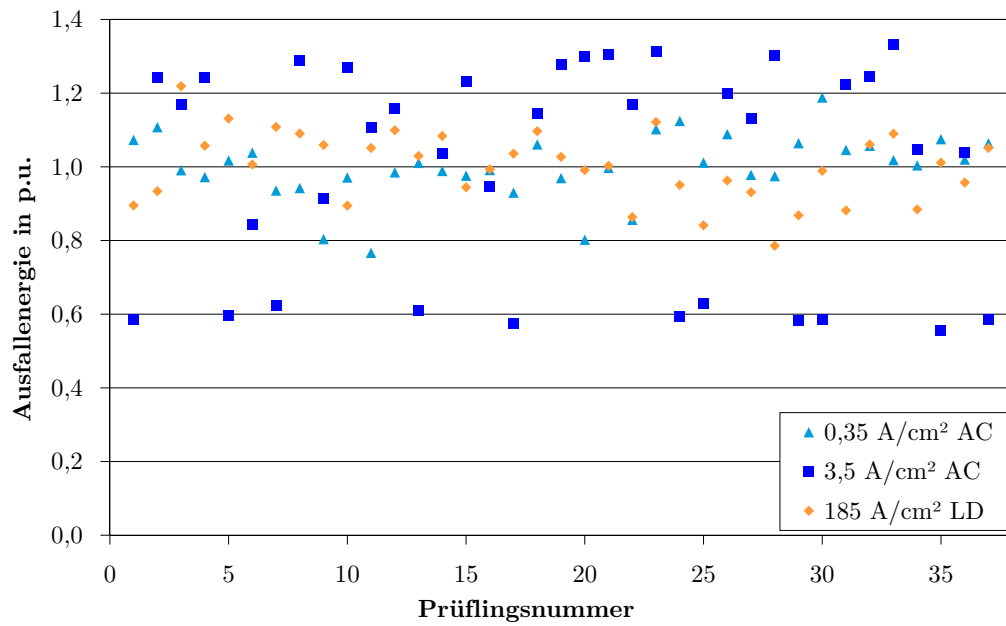
Für die MO-Varistoren der „Größe 2“ sind die mittleren Ausfallenergien<sup>93</sup> in *Abbildung 5.7* und die Fehlermechanismen der einzelnen Energieeinträge in *Abbildung 5.8* dargestellt. An diesen MO-Varistoren wurden nur Impulsenergieeinträge, hier jedoch aufgrund der Relevanz auch Doppelsexponentialstoßströme der Form 4/10 µs durchgeführt.

Als Ergebnis der Untersuchung an den MO-Varistoren der „Größe 2“ lassen sich die nachfolgenden Aussagen festhalten (die ebenfalls in den oben genannten Veröffentlichungen dargestellt sind):

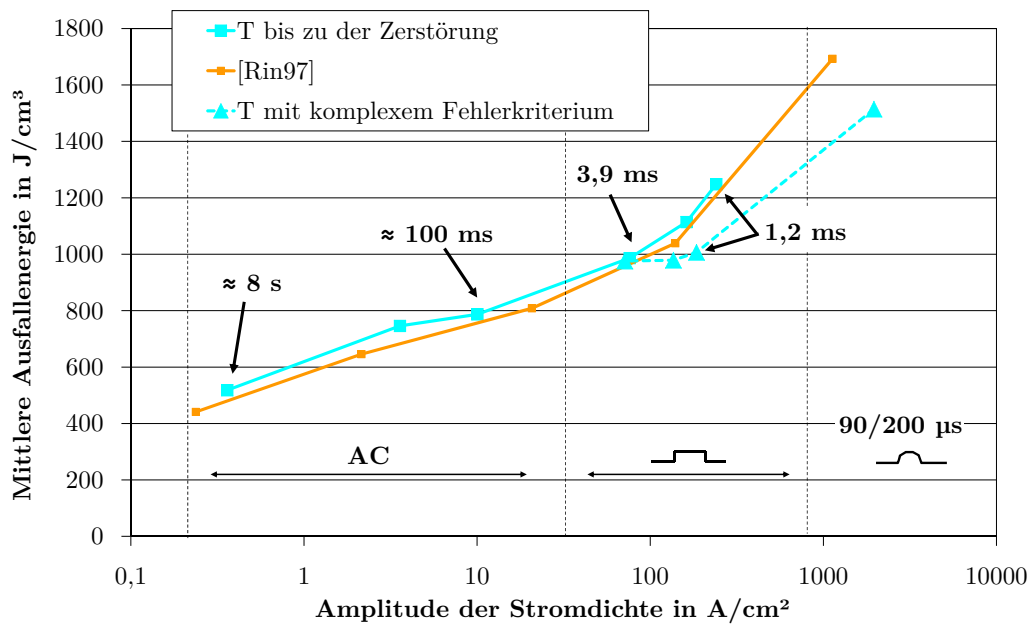
<sup>92</sup> In der Ausgangsmessung fallen MO-Varistoren durch Änderung der „charakteristischen Spannung“, Änderung der Restspannung, bzw. mechanischen Ausfalls während der Ausgangsmessung infolge der Belastung durch den Hauptenergieeintrag aus.

<sup>93</sup> Die Untersuchungen zum Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen bei Belastung mit Rechteckimpulsen von Produktionslosen der Hersteller „S“, „U“, „V“, „W“ und „Y“ wurden von [Rei08] durchgeführt. Die Untersuchungen mit Doppelsexponentialstoßströmen wurden in Zusammenarbeit der beiden Autoren durchgeführt und sind in [Rei08] enthalten. Die Energieeinträge an „X“ wurden vom Autor dieser Arbeit nach [Rei08] durchgeführt. Alle Untersuchungen sind in [Cig13] enthalten.

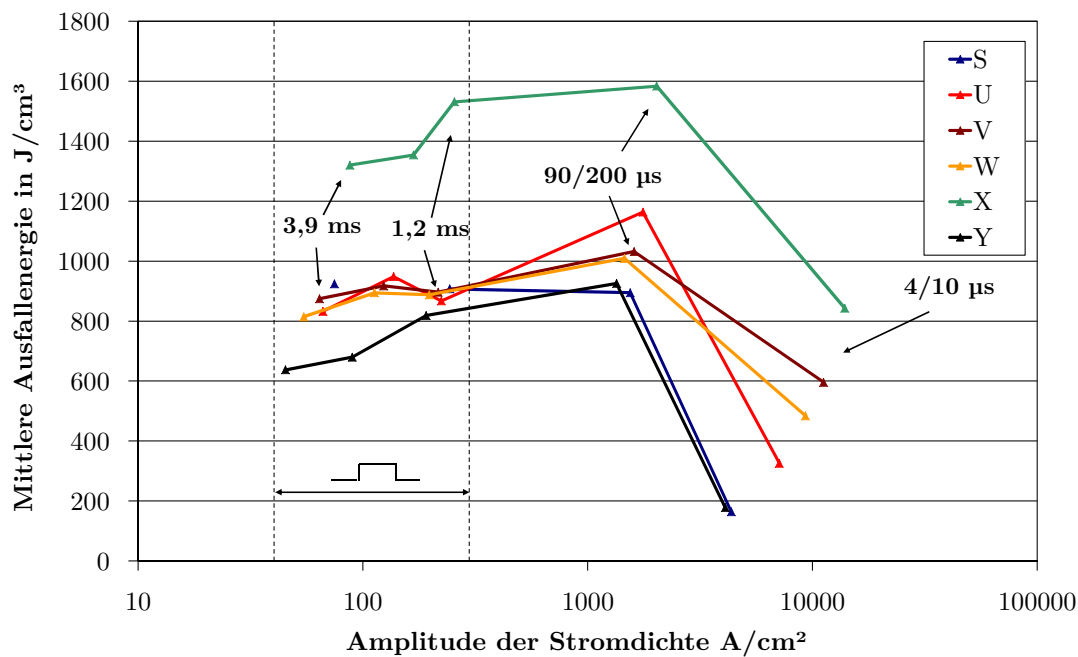




**Abbildung 5.5:** Übersicht über die auf den Mittelwert einer Stromdichte normierten Ausfallenergie bei Belastung mit unterschiedlichen Stromdichten. Die Stromdichten mit 0,35 A/cm² und 3,5 A/cm² werden durch Wechselstromenergieeinträge („AC“) und 185 A/cm² Rechteckimpulse („LD“) bestimmt.



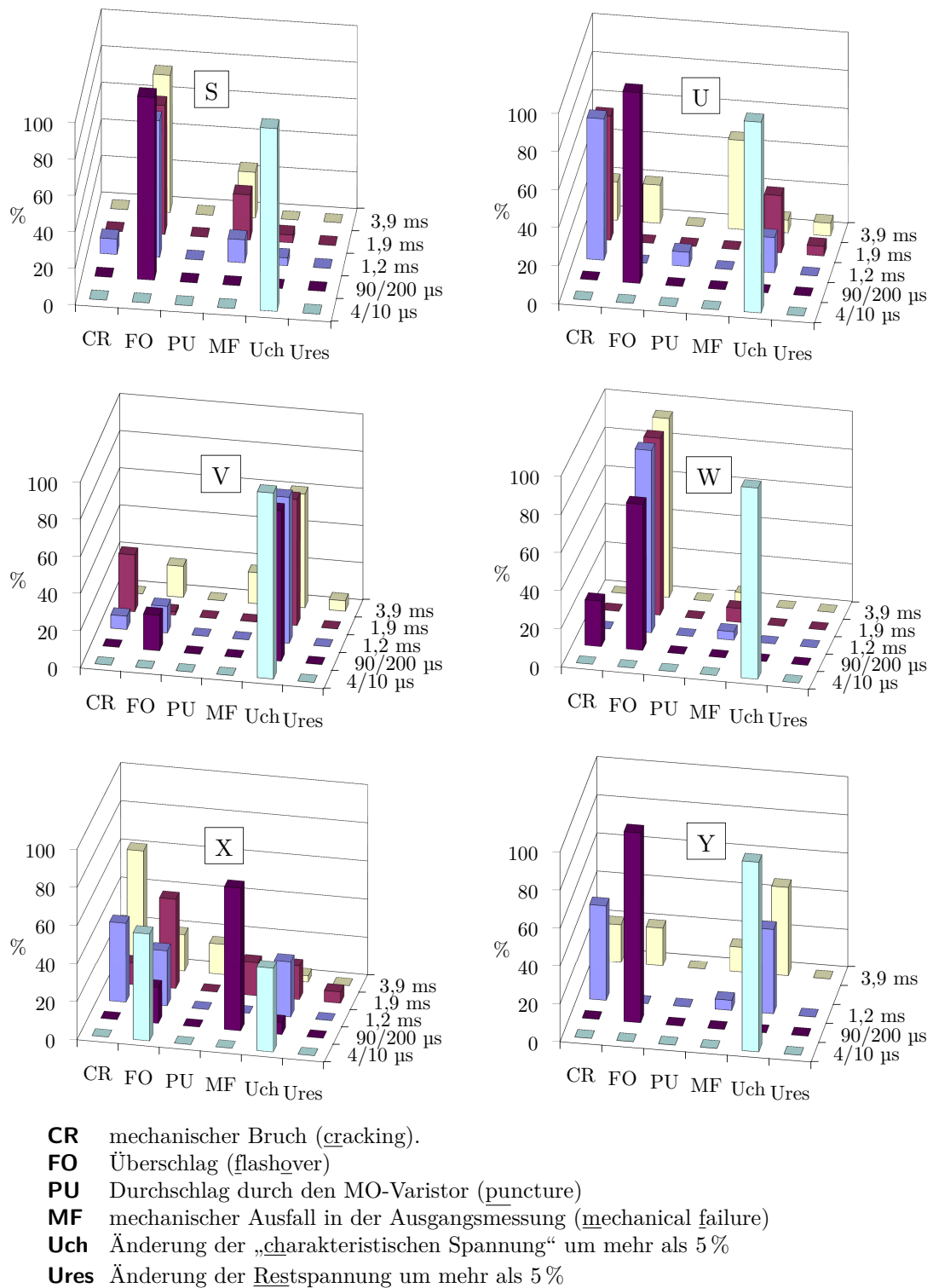
**Abbildung 5.6:** Vergleich des mittleren Einzelimpulsenergieaufnahmevermögens der MO-Varistoren „T“ („Größe 1“) bei Untersuchungen mit komplexem Fehlerkriterium bzw. Belastung bis zur Zerstörung, im Vergleich zu den Untersuchungsergebnissen von [Rin97] (nach [Cig13])



**Abbildung 5.7:** Mittlere Einzelimpulsausfallenergie über dem Scheitelwert der Stromdichte des Energieeintrags für die MO-Varistoren der „Größe 2“ (nach [Cig13])

- Im Bereich der Belastungen mit Rechteckimpulsen liegt das volumenbezogene mittlere Energieaufnahmevermögen im Bereich von  $600 J/cm^3$  bis  $1000 J/cm^3$  und damit etwa 15 % bis 25 % niedriger als das der MO-Varistoren der „Größe 1“. Wie unten dargestellt, haben MO-Varistoren mit kleinerem Durchmesser im allgemeinen ein höheres Energieaufnahmevermögen, in diesem Fall lässt sich der Unterschied jedoch durch die unterschiedlichen Fehlermechanismen erklären. Die MO-Varistoren der „Größe 2“ fallen verhältnismäßig häufig durch Überschlüge aus. Offensichtlich ist die Glasur für solch hohe Belastungen nicht ausgelegt.
- Für die Doppel exponentialstoßströme der Form 90/200  $\mu s$  steigt das mittlere Energieaufnahmevermögen nicht so stark an wie bei den MO-Varistoren der „Größe 1“. Der Anteil der Ausfälle durch Überschlag während des Energieeintrags nimmt bei den MO-Varistoren einzelner Produktionslose zu. Dies ist aufgrund der höheren Spannungsbelastung auch zu erwarten, bietet jedoch auch Optimierungspotential.
- Für die Doppel exponentialstoßströme der Form 4/10  $\mu s$  nimmt das Energieaufnahmevermögen wieder ab, was auf eine Zunahme der Ausfälle durch die Änderung der „charakteristischen Spannung“ zurückzuführen ist. Diese Änderung beeinflusst jedoch nicht das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen bei Belastungen bis zum mechanischen Ausfall, wie in Kapitel 5.5.1 dargestellt wird.

## 5.1 Einzelimpulsbelastbarkeit von MO-Varistoren



**Abbildung 5.8:** Fehlermechanismen der Impulsenergieeinträge (unter Verwendung des „komplexen Fehlerkriteriums“) der MO-Varistoren der „Größe 2“ (nach [Cig13])

- Die MO-Varistoren „X“ fallen durch ein sehr hohes Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen, wie auch schon bei den MO-Varistoren der Größe 1, auf. Hier scheint die Glasur offensichtlich für höhere Spannungsbelastungen ausgelegt zu sein. Weiterhin scheint dieser Hersteller eine sehr hohe Homogenität der MO-Varistoren erreichen zu können.

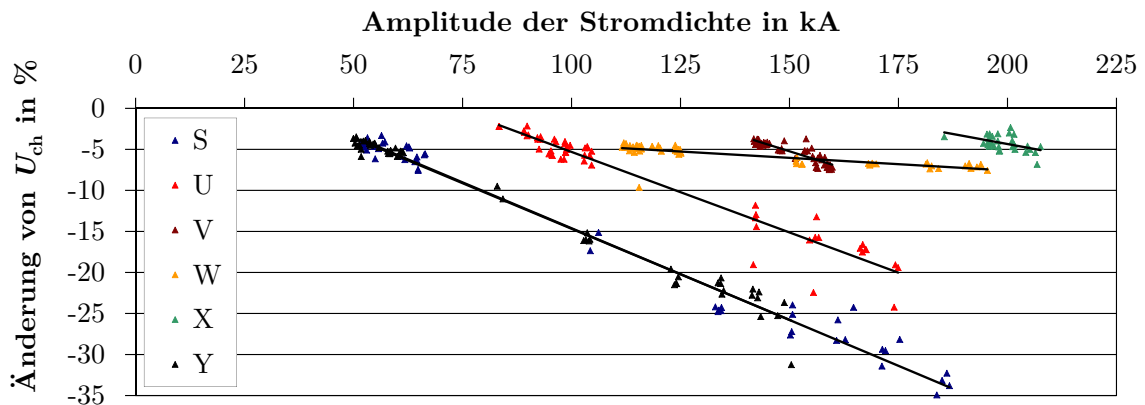
Die Änderung der „charakteristischen Spannung“ infolge von Energieeinträgen der Form  $4/10\text{ }\mu\text{s}$ , werden in [Rei08] weiter ausgewertet. Die Darstellung der Änderung der „charakteristischen Spannung“ über dem Stromscheitelwert<sup>94</sup> des Energieeintrags ist *Abbildung 5.9* zu entnehmen. Jede Markierung in diesem Diagramm<sup>95</sup> stellt einen vorbelasteten MO-Varistor eines Produktionsloses dar. Es ist zu erkennen, dass die Streuung der einzelnen MO-Varistoren für die unterschiedlichen Produktionslose unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Jedoch scheint die Änderung der „charakteristischen Spannung“ für alle Produktionslose in erster Näherung linear<sup>96</sup> von dem Stromscheitelwert des Energieeintrags abhängig zu sein. Einige Produktionslose zeigen eine starke Änderung der „charakteristischen Spannung“ bereits bei einem Stromscheitelwert von 100 kA des Energieeintrags, der nach [IEC60099-4] für den Nachweis der thermischen Stabilität für Überspannungsableiter mit typischerweise dieser MO-Varistorgöße verwendet wird. Weitere Untersuchungen zum Einfluss der Änderung der „charakteristischen Spannung“ auf das Energieaufnahmevermögen und zur Rückbildung bei anliegender Dauerspannung und bei erhöhter Temperatur sind in Kapitel 5.5.1 und Kapitel 5.5.2 dargestellt.

Das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen der MO-Varistoren der „Größe 1“ unterscheidet sich von denen der „Größe 2“ selbst bei ein und demselben Hersteller. Dies ist möglicherweise unterschiedlichen Fertigungsverfahren bzw. Optimierungen der MO-Varistoren für unterschiedliche Anwendungsbereiche geschuldet. [Rei08] untersuchte das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen bei Wechselstromenergieeinträgen von MO-Varistoren eines Herstellers mit unterschiedlichen Durchmessern welche (nach Herstellerangaben) mit gleichen Fertigungsverfahren hergestellt wurden. Die Ergebnisse sind in *Abbildung 5.10* dargestellt. Trotz der Streuung der Versuchsergebnisse ist zu erkennen, dass die mittlere Ausfallenergie mit steigendem MO-Varistordurchmesser sinkt, was sich mit den Untersuchungsergebnissen von [Eda84] deckt. Das ist nach [Cig13] nicht nur auf das größere Volumen, mit dem sich generell die Ausfallwahrscheinlichkeit erhöht, sondern vermutlich auch auf ein zunehmendes Maß an Inhomogenität zurückzuführen (was [Eda84] ebenfalls vermutet).

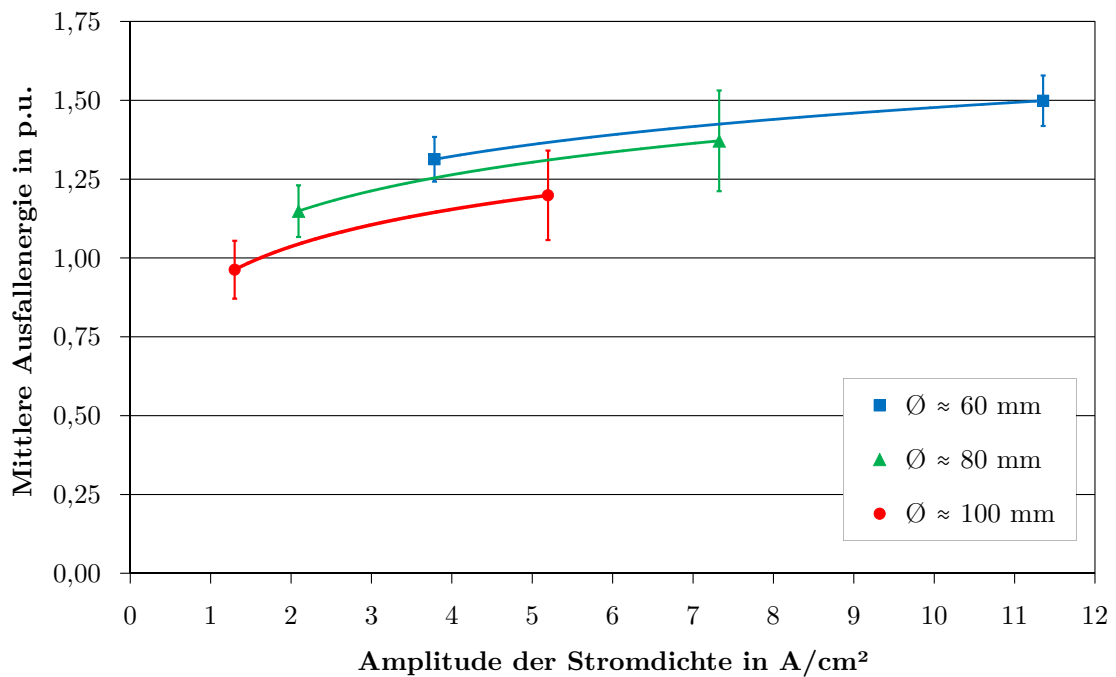
<sup>94</sup> Da sich die Durchmesser der MO-Varistoren der „Größe 2“ nur gering unterscheiden, wird hier die absolute Darstellung gewählt.

<sup>95</sup> Über welchen Strombereich des Energieeintrags die Änderung der „charakteristischen Spannung“ dargestellt ist, hat versuchstechnische und keine prüflingsspezifischen Gründe.

<sup>96</sup> Aus physikalischen Gründen ist anzunehmen, dass der Trend die Abszisse erst für sehr kleine Stromscheitelwerte des Energieeintrags überquert.



**Abbildung 5.9:** Änderung der „charakteristischen Spannung“  $U_{ch}$  infolge eines Doppel-exponentialstoßstroms der Form  $4/10 \mu s$  an MO-Varistoren der „Größe 2“ (nach [Cig13])



**Abbildung 5.10:** Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen bei Belastung mit Wechselstromenergieeinträgen von MO-Varistoren unterschiedlicher Durchmesser, jedoch gleichen Fertigungsverfahrens (nach [Rei08])

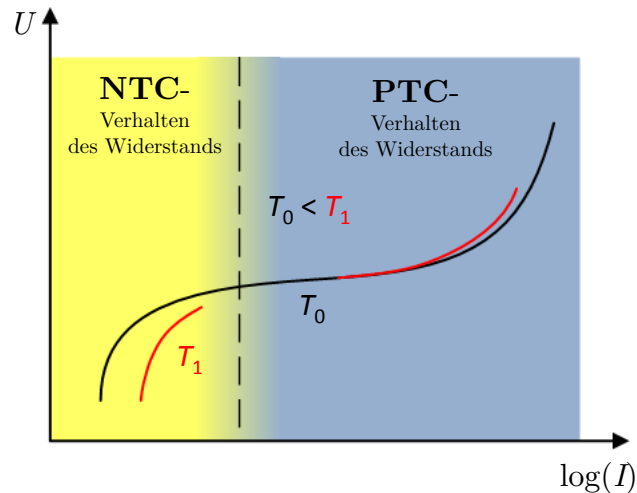
## 5.2 Einfluss der Temperaturabhängigkeiten auf das Energieaufnahmevermögen

Energieeinträge können Veränderungen im MO-Varistor hervorrufen, da der Stromfluss die Ladungsverteilung an der Korngrenze verändern kann (siehe Kapitel 2.2). Außerdem führt die im MO-Varistor umgesetzte Wärme zu thermischen Spannungen, die zu mikro- oder makroskopischen Brüchen und im kritischsten Fall bis hin zum partiellen Aufschmelzen der Keramik führen kann. Während bei den in der Vergangenheit häufiger untersuchten Impulsenergieeinträgen sehr kurzer Dauer (im Bereich weniger zehn Mikrosekunden), die durch den Stromfluss entstehenden Veränderungen bzw. die Spannungsfestigkeit der Glasur im Vordergrund stehen, nimmt bei längeren Energieeinträgen mit größerem Energieinhalt der Einfluss der Wärme zu. Für multiple Energieeinträge (in kurzen Abständen) sind nicht nur die durch den Stromfluss der vorherigen Impulse initiierten Veränderungen der Ladungsverteilung, sondern auch die Temperatur bzw. Temperaturverteilung im MO-Varistor von Bedeutung.

Nicht nur innerhalb von MO-Varistoren, auch zwischen parallelen Säulen kann es zu Temperaturunterschieden durch ungleiche Aufteilung des Stromflusses bei einem Energieeintrag kommen. Ebenso sorgt in räumlich ausgedehnten Überspannungsableiterbänken (z. B. zum Schutz von Kondensatoren, siehe Kapitel 2.1) Sonneneinstrahlung/Verschattung unter Umständen zu Temperaturunterschieden zwischen räumlich getrennten MO-Varistorsäulen. Auf diese Weise kann bei einem Energieeintrag eine ungleiche Stromaufteilung zwischen den Säulen auftreten. Diese Beispiele machen deutlich, dass nicht nur Strompfadbildungen innerhalb eines MO-Varistors, sondern auch makroskopische Stromaufteilungen zwischen MO-Varistoren von praktischer Relevanz sind. In den folgenden Abschnitten wird der Einfluss der Temperatur auf die Stromaufteilung zwischen MO-Varistoren betrachtet, und von diesen Untersuchungen werden wiederum Rückschlüsse auf die Bildung von Strompfaden innerhalb eines MO-Varistors gezogen. Zum Abschluss werden Untersuchungen zur Temperaturabhängigkeit des Einzelimpulsenergieaufnahmevermögens vorgestellt.

### 5.2.1 Bestimmung der Temperaturabhängigkeit der *UI*-Kennlinie im Durchbruchbereich

Es ist bekannt, dass MO-Varistoren im Vordurchbruchbereich der *UI*-Kennlinie ein Warmleiterverhalten aufweisen (siehe z. B. [Eda89]) und somit der Widerstand einen negativen Temperaturkoeffizienten (NTC) aufweist. Weiterhin wird angenommen, dass im Hochstrombereich ein schwach ausgeprägtes Kaltleiterverhalten (PTC-Verhalten des Widerstandes)



**Abbildung 5.11:** Schaubild zur Temperaturabhängigkeit der  $UI$ -Kennlinie von MO-Varistoren (nach [Hal12])

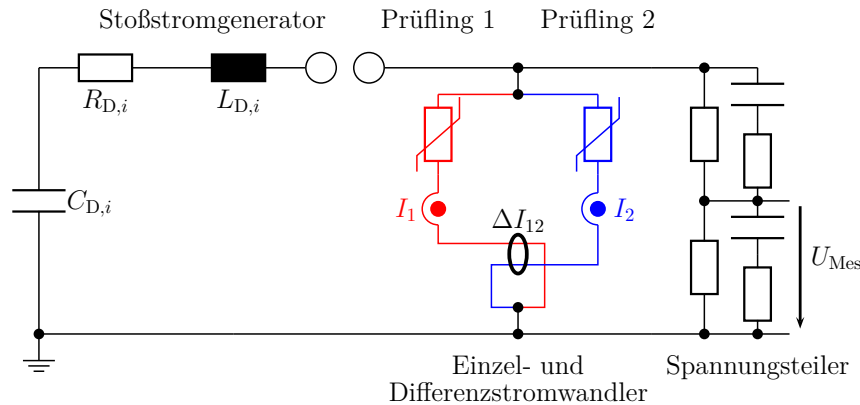
vorherrscht (siehe z. B. [Sch94] und [FH03]). Dies wird damit begründet, dass hier weniger die Leitfähigkeit der Korngrenzen als vielmehr die der Körner die Gesamtleitfähigkeit des MO-Varistors bestimmt. Dieses Verhalten ist in *Abbildung 5.11* veranschaulicht.

Die genaue Kenntnis des Temperaturverhaltens im Durchbruchbereich der  $UI$ -Kennlinie ist für die Modellierung des Energieaufnahmevermögens durch computergestützte Simulationen von großem Interesse. Um diese zu unterstützen, sowie um die Frage zu klären, in welchem Bereich der  $UI$ -Kennlinie das Temperaturverhalten wechselt und um thermische Effekte besser einordnen zu können, werden in diesem Unterabschnitt die Untersuchungen zur Bestimmung der Temperaturabhängigkeit im Durchbruchbereich der  $UI$ -Kennlinie von MO-Varistoren vorgestellt.

Die Quantifizierung der Temperaturabhängigkeit im Bereich hoher Nichtlinearität der  $UI$ -Kennlinie ist eine besondere Herausforderung, da die Spannungsänderung (bei konstanter Stromdichte) bei Temperatursprüngen im Bereich von mehreren 10 K nur im Prozentbereich variiert und damit im Bereich der Messunsicherheit üblicher verwendeter Messsysteme liegt. Aus diesem Grund wird in [Had05] die Verwendung der Stromverteilungsmessung zur Bestimmung der Temperaturabhängigkeit in diesem Bereich der  $UI$ -Kennlinie vorgeschlagen, welche für die nachfolgend vorgestellten Untersuchungen<sup>97</sup> verwendet wird.

Das Prinzipschaltbild des Versuchskreises zur Stromverteilungsmessung ist *Abbildung 5.12* und eine Ansicht der verwendeten Prüflingsaufnahme *Abbildung 5.13* zu entnehmen. Für die Untersuchung werden zwei MO-Varistoren „Prüfling 1“ und „Prüfling 2“ gleichzeitig

<sup>97</sup> Die Untersuchungen sind auch in der Diplomarbeit [Hal12] dokumentiert und ausgewertet.



**Abbildung 5.12:** Prinzipschaltbild der Stromverteilungsmessung.  $I_1$  und  $I_2$  sind die Einzelströme durch die Prüflinge,  $\Delta I_{12}$  der Differenzstrom und  $U_{\text{Mes}}$  die Spannung, die an das Oszilloskop übertragen wird.

mit einem Stoßstrom belastet. Dabei werden die Spannung<sup>98</sup> an den Prüflingen sowie der Einzel<sup>99</sup>- und der Differenzstrom<sup>100</sup> durch die beiden Prüflinge erfasst.

Die Untersuchung wird an zwei unterschiedlichen Produktionslosen von MO-Varistoren durchgeführt, die im Folgenden mit Keramik 1 und 2 bezeichnet werden. Dabei wird jeweils die Stromaufteilung zwischen zwei MO-Varistoren (gleicher Keramik) gemessen, wobei Prüfling 1 bei definierter erhöhter Temperatur<sup>101</sup> in der temperierten Prüfkammer und Prüfling 2 bei Umgebungstemperatur<sup>102</sup> belastet wird. Die beiden parallelen Stränge der Prüflingsaufnahme weisen, bedingt durch den mechanischen Aufbau sowie die unterschiedlichen ohmschen Widerstände der Zuleitungen (bei unterschiedlichen Temperaturen), Impedanzunterschiede auf. Wie nachgewiesen werden konnte, sind diese im Verhältnis zu den vergleichsweise hochohmigen MO-Varistoren vernachlässigbar und beeinflussen demnach nur untergeordnet die Messunsicherheit. Durch die Verwendung desselben Ver-

<sup>98</sup> Zur Messung der Spannung wird der in Tabelle A.8 beschriebene Spannungsteiler verwendet.

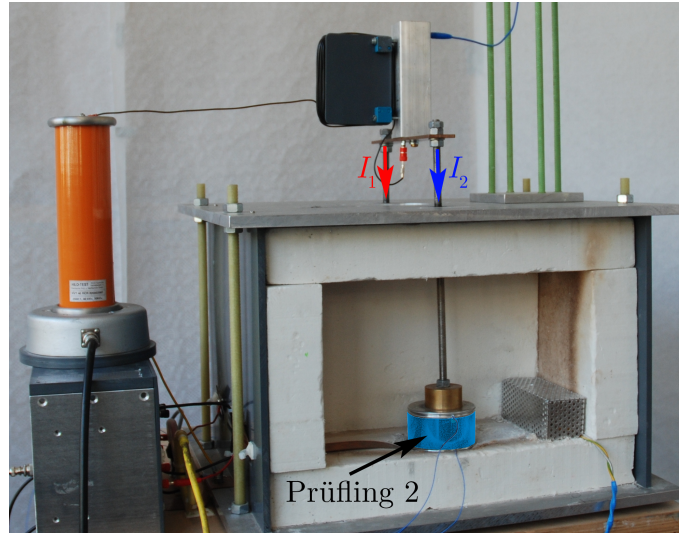
<sup>99</sup> Zur Messung wird je nach Messbereich der Stromwandler der Firma „Pearson Electronics Inc.“, Modell „410“ mit einem Frequenzbereich von 0,120 kHz bis 20 000 kHz und einer Genauigkeit des Übersetzungsverhältnisses von 1 % sowie die in Tabelle A.7 dargestellten Stromwandler des Typs „CWT30“ und „CWT150“ verwendet.

<sup>100</sup> Zur Messung wird für alle Untersuchungen der Stromwandler der Firma „Pearson Electronics Inc.“, Modell „110“ mit einem Frequenzbereich von 0,001 kHz bis 20 000 kHz und einer Genauigkeit des Übersetzungsverhältnisses von 1 % verwendet.

<sup>101</sup> Die Temperatur wird mittels des in Tabelle A.14 beschriebenen Temperaturmesssystems mit den in Tabelle A.15 beschriebenen Temperatursensoren überwacht und für die Untersuchungen in einem Bereich von  $\pm 1$  % um den Sollwert konstant gehalten. Vorgewärmt werden die MO-Varistoren über mindestens acht Stunden in einem handelsüblichen Temperaturschrank.

<sup>102</sup> Da die für die Untersuchung verwendeten Stoßströme nur bezogene Energiedichten von wenigen J/cm<sup>3</sup> enthalten und die Prüflinge nicht thermisch isoliert belastet werden, ist nur in sehr seltenen Fällen eine externe Kühlung des Prüflings 2 notwendig. Weiterhin wird zwischen den einzelnen Stoßströmen eine Wartezeit von 60 s eingehalten.





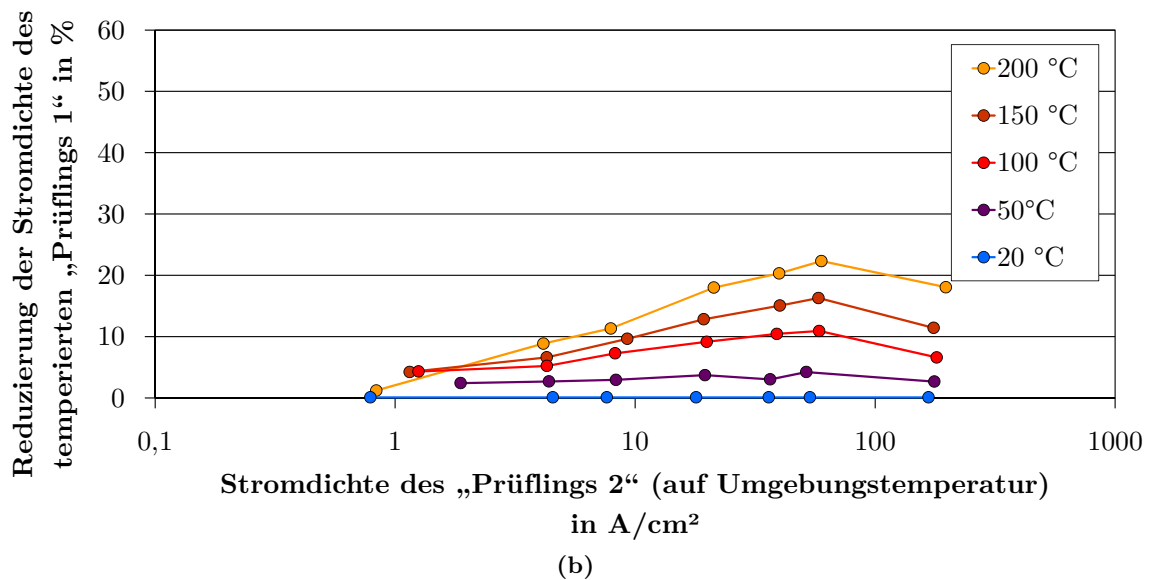
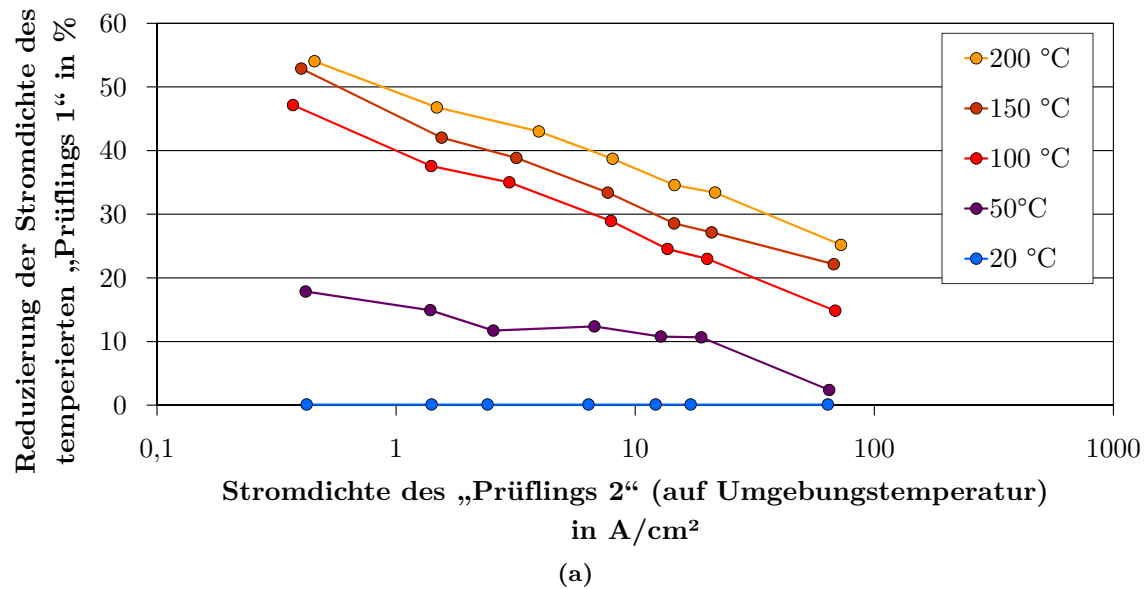
**Abbildung 5.13:** Eine Seite der symmetrischen Prüflingsaufnahme zur Stromverteilungsmessung, die für die Untersuchungen zur Temperaturabhängigkeit im Durchbruchbereich der  $UI$ -Kennlinie verwendet wird.

gleichsprüflings 2 im Prüflingspärchen und der Anwendung von Konditionierungsimpulsen vor den ausgewerteten Stoßströmen können Veränderungen der MO-Varistoren durch die Stoßstrombelastung weitgehend kompensiert werden.

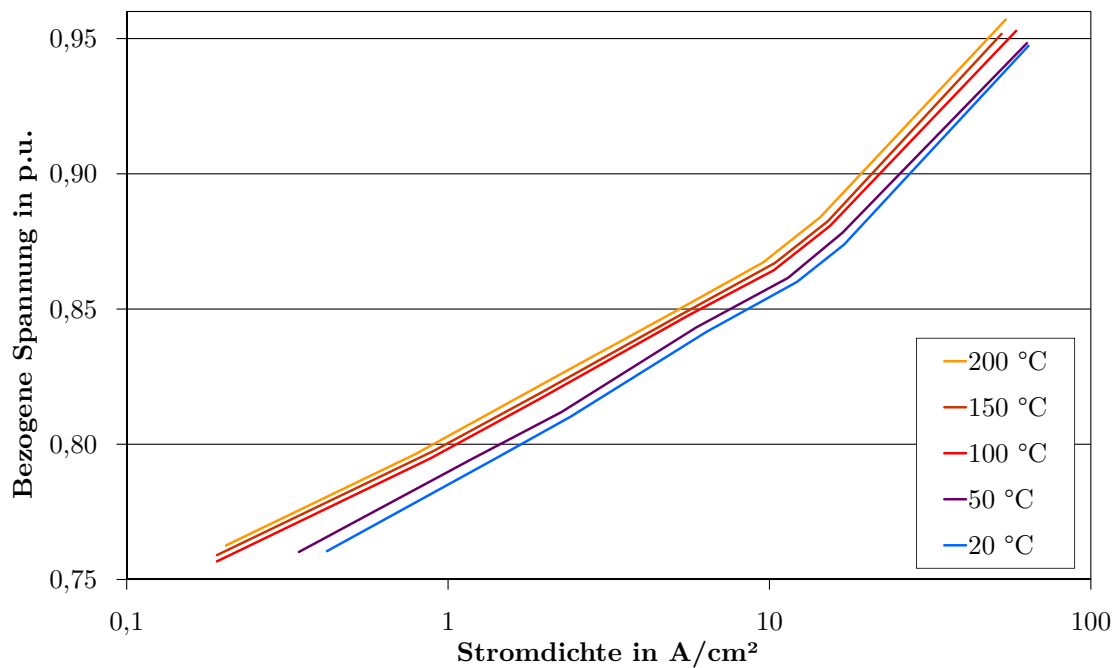
Die Ergebnisse der Untersuchung sind für die Keramik 1 in *Abbildung 5.14(a)* und für die Keramik 2 in *Abbildung 5.14(b)* dargestellt. In beiden Diagrammen ist auf der Ordinate der prozentuale Stromunterschied bei gleichzeitiger Belastung mit einem Stoßstrom<sup>103</sup> der Form  $30/60\text{ }\mu\text{s}$  zwischen dem temperierten Prüfling 1 und dem Prüfling 2 bei Umgebungstemperatur aufgetragen. Auf der Abszisse ist die Stromdichte durch den MO-Varistor auf Umgebungstemperatur (Prüfling 2) aufgetragen. Der untersuchte Stromdichtebereich reicht von  $0,3\text{ A/cm}^2$  bis  $200\text{ A/cm}^2$ , der Nichtlinearitätsexponent (siehe Kapitel 2.2) sinkt in diesem Bereich der  $UI$ -Kennlinie von etwa 60 auf 30. Der Temperaturbereich des jeweiligen Prüflings 1 liegt im Bereich von  $20\text{ }^\circ\text{C}$  bis  $200\text{ }^\circ\text{C}$ . Weiterführende Untersuchungen zeigten, dass die Stoßstromimpulse zur Prüfung der  $UI$ -Kennlinie ab einer Temperatur von  $200\text{ }^\circ\text{C}$  den MO-Varistor konditionieren, sodass dadurch die Stromdifferenz der Prüflingspärchen bei Raumtemperatur um mehr als 5 % irreversibel verändert wird. Aus diesem Grund wird der Temperaturbereich der Untersuchung nicht weiter ausgedehnt.

Es ist zu erkennen, dass für die MO-Varistoren der Keramik 1 zunächst der Stromdichte-

<sup>103</sup> Die Messpunkte mit der jeweils höchsten Stromdichte sind in beiden Diagrammen aus versuchstechnischen Gründen durch Messung mit einem Stoßstrom der Form  $8/20\text{ }\mu\text{s}$  bestimmt worden. Es konnte gezeigt werden, dass der Einfluss der Stromform im betrachteten Bereich vernachlässigbar ist.



**Abbildung 5.14:** Änderung der Stromdifferenz bei verschiedenen Temperaturen für die MO-Varistoren der Keramik 1 (a) und die der Keramik 2 (b).



**Abbildung 5.15:** Darstellung der temperaturabhängigen *UI*-Kennlinie der Keramik 1 im untersuchten Stromdichtebereich

unterschied zwischen dem temperierten Prüfling 1 und dem auf Umgebungstemperatur befindlichen Prüfling 2 mit der Temperatur steigt. Dabei ist eine dargestellte Reduzierung der Stromdichte um 50 % gleichbedeutend mit einer Halbierung des Stromes im wärmeren MO-Varistor durch die erhöhte Temperatur. Der prozentuale Unterschied der Stromdichte durch die beiden Prüflinge sinkt mit steigender Stromdichte des Stromes durch den Prüfling 2 (auf Umgebungstemperatur). Dies kommt, bedingt durch den abnehmenden Nichtlinearitätsexponenten bei höheren Stromdichten, einer vertikalen Verschiebung der *UI*-Kennlinie durch die erhöhte Temperatur sehr nahe, wie der Darstellung der temperaturabhängigen *UI*-Kennlinie in *Abbildung 5.15* zu entnehmen ist. Bei hohen Temperaturen ist eine geringere Änderung der Reduktion der Stromdichte zwischen den Temperaturschritten zu beobachten.

Die untersuchte Keramik 2 zeigt laut *Abbildung 5.14(b)* zunächst für alle Temperaturen ein ansteigendes Verhalten der Stromdifferenz mit steigender Belastungsstromdichte, bis bei der höchsten untersuchten Stromdichte eine leicht abnehmende Tendenz zu erkennen ist. Die Temperaturabhängigkeit ist im betrachteten Strombereich bei dieser Keramik geringer ausgeprägt als bei den MO-Varistoren der Keramik 1.

Beide Keramiken weisen im Vordurchbruchbereich ihrer *UI*-Kennlinie einen negativen

Temperaturkoeffizienten des Widerstandes auf. Aus diesem Grund ist zu vermuten, dass bei den MO-Varistoren der Keramik 1 für kleine Stromdichten ein Vorzeichenwechsel und anschließend ein Anstieg der Änderung der Stromdichte erfolgt, wie es im untersuchten Stromdichtebereich der Keramik 2 zu beobachten ist. Es kann durch die vorliegenden Untersuchungen nicht nachgewiesen werden, ob die beiden MO-Varistorkeramiken der gleichen Tendenz folgen, diese jedoch in der Stromdichte zueinander verschoben ist, oder ob unterschiedliche Mechanismen wirken.

Im untersuchten Stromdichte- und Temperaturbereich ist für beide Keramiken ein positiver Temperaturkoeffizient des Widerstandes der MO-Varistoren zu beobachten. Dieser könnte außer durch den stärker werdenden Einfluss des Kaltleitverhaltens des Kornes auch durch einen Anstieg der Potentialbarriere erklärt werden (wie auch in [Hal12] beschrieben). Bei letzterem könnten durch die Temperaturerhöhung freie Ladungsträger entstehen, wobei die negativen Ladungen Defektzustände in der Korngrenze kompensieren und die positiven im Korn verbleiben. Die verbleibenden positiven Ladungen vergrößern mit steigender Temperatur die Verarmungszone und damit die Potentialbarriere. Somit ist mit steigender Temperatur eine höhere Spannung erforderlich, damit Ladungsträger die Potentialbarriere überwinden können, was makroskopisch ein PTC-Verhalten des Widerstandes<sup>104</sup> bewirkt. Da nur eine endliche Anzahl an Defektzuständen der Korngrenze existieren, muss die Änderung mit steigender Temperatur geringer werden und bei hohen Temperaturen zum Erliegen kommen, was für den Temperaturbereich von 200 °C bei den MO-Varistoren der Keramik 1 beobachtet wird. Ob bei den MO-Varistoren der Keramik 2 schon nahezu alle Defektzustände vollständig besetzt sind und deshalb ein anderer Mechanismus greift, oder im Gegenteil bis 200 °C noch nicht alle Defektzustände besetzt sind und deshalb kein Sättigungseffekt zu erkennen ist, kann mit dieser Untersuchung nicht nachgewiesen werden.

Es bleibt darauf hinzuweisen, dass bei höheren Temperaturen nicht nur die freie Ladungsträgerdichte im MO-Varistor zunimmt, sondern die Beweglichkeit der Ladungsträger abnimmt, was den Widerstand erhöht (siehe z. B. [FH03]). Dies könnte ein Grund für die Abnahme der Stromdifferenz im Bereich von 100 A/cm<sup>2</sup> der MO-Varistoren der Keramik 2 sein. Weiterhin steigt die Anzahl der freien Ladungsträger nicht nur mit der Temperatur, sondern auch mit der angelegten Spannung (und damit mit der Stromdichte der Belastung), was ein weiteres Indiz dafür ist, dass die Temperaturabhängigkeit mit steigender Stromdichte abnehmen muss.

Die Ergebnisse der Untersuchung bestätigen, dass im Durchbruchbereich der *UI*-Kenn-

---

<sup>104</sup> Im Vordurchbruchbereich der *UI*-Kennlinie entsteht durch die erhöhte Anzahl an freien Ladungsträgern ein höherer Leckstrom, was makroskopisch als NTC-Verhalten des Widerstandes interpretiert wird.

linie der Temperaturkoeffizient des Widerstandes das Vorzeichen und damit der MO-Varistor von einem Warmleiter- zu einem Kaltleiterverhalten wechselt. Weiterhin ist die Temperaturabhängigkeit der Stromdichte keine Konstante, sondern stark von der MO-Varistorkeramik und wahrscheinlich, wie die Untersuchungen an der Keramik 2 und ergänzende Untersuchungen bei höheren Temperaturen zeigten, auch von der Temperatur abhängig.

Wenn sich durch weitere Untersuchungen bestätigen sollte, dass die Temperaturabhängigkeit der *UI*-Kennlinie und der Nulldurchgang des Temperaturkoeffizienten von der MO-Varistorkeramik abhängig sein sollte, könnte dies einen weiteren Hinweis zur Erklärung der Unterschiede im Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen verschiedener Hersteller liefern. Eine Keramik mit ausgeprägtem positiven Temperaturkoeffizienten des Widerstandes müsste bei Energieeinträgen eine inhomogene Stromaufteilung besser vergleichmäßigen können als eine mit einem geringeren positiven Temperaturkoeffizienten. Das Energieaufnahmevermögen der untersuchten Keramiken deutet in die gleiche Richtung, jedoch ist die Stichprobe zu klein, um diese weiterführend zu interpretieren.

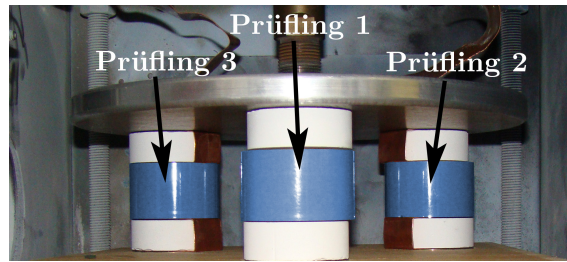
### 5.2.2 Stromaufteilung zwischen parallel belasteten MO-Varistoren

In computergestützten Simulationen zu Stromaufteilungen innerhalb von MO-Varistoren wie z. B. [Bar96b] (siehe Kapitel 2.5) werden bislang Veränderungen der MO-Varistoren durch den Energieeintrag, wie die vorgenannte Temperaturabhängigkeit im Durchbruchbereich der *UI*-Kennlinie, nicht berücksichtigt. Eine experimentelle messtechnische Erfassung einzelner Stromkanäle innerhalb eines einzelnen MO-Varistors während eines Energieeintrags ist nur mit sehr hohem Aufwand möglich. Ein Eindruck der Entwicklung der Stromaufteilung zwischen parallelen Strompfaden innerhalb eines MO-Varistors kann jedoch durch Beobachtung der Stromaufteilung zwischen parallel belasteten MO-Varistoren gewonnen werden. Diese Anordnung hat auch praktische Relevanz, da in Überspannungsableitern zur Steigerung des Energieaufnahmevermögens unter Umständen mehrere parallele MO-Varistorsäulen (mit produktionsbedingter ungleicher Stromaufteilung von bis zu 10 %) eingesetzt werden. Die Entwicklung der Stromaufteilung während eines Energieeintrags in einer solchen Anordnung ist bislang unbekannt und soll mit der nachfolgenden Untersuchung<sup>105</sup> eingegrenzt werden.

In dieser Untersuchung werden drei MO-Varistoren der „Größe 1“ eines Produktionsloses gleichzeitig mit einem Rechteckimpuls belastet und die Stromaufteilung während des Energieeintrags ausgewertet. Die drei MO-Varistoren haben produktionsbedingt leicht

---

<sup>105</sup> Die Untersuchungen sind auch in der Bachelorarbeit [Böl10] dokumentiert und ausgewertet.



**Abbildung 5.16:** Versuchsaufbau zur Parallelbelastung von drei MO-Varistoren

unterschiedliche *UI*-Kennlinien, die zu einer ungleichen Stromaufteilung zwischen den MO-Varistoren führen. Auf diese Weise werden drei parallele Strompfade leicht unterschiedlicher *UI*-Kennlinien makroskopisch nachgebildet.

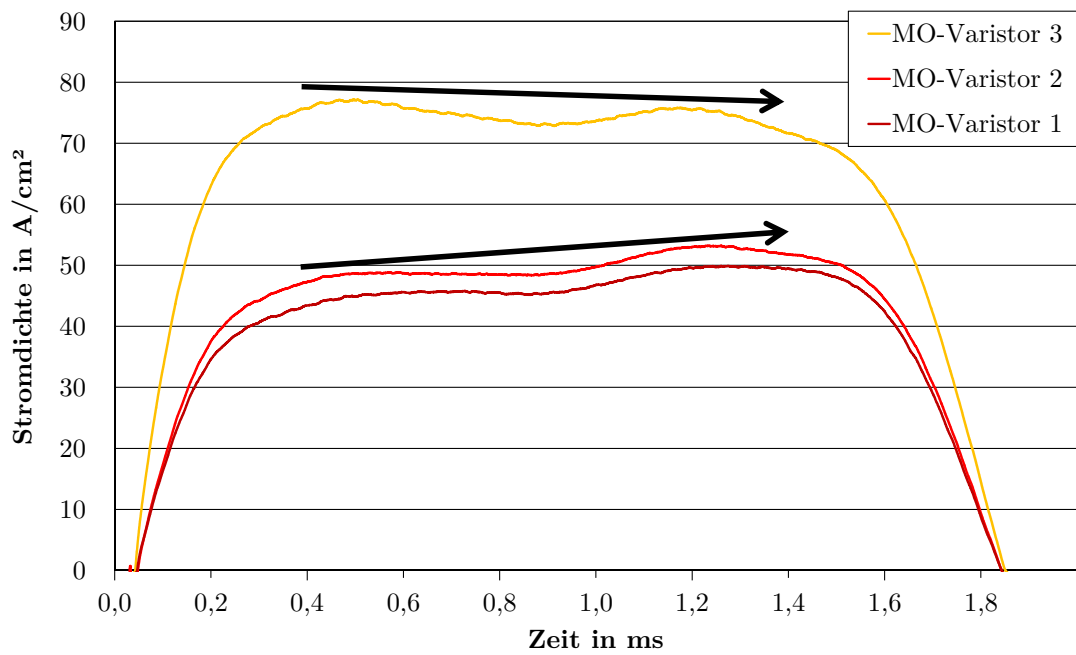
Die modifizierte Einspannvorrichtung mit drei eingespannten MO-Varistoren ist *Abbildung 5.16* zu entnehmen. Der Stromfluss durch jeden einzelnen MO-Varistor wird mittels eines separaten Stromwandlers<sup>106</sup> erfasst. Es konnte nachgewiesen werden, dass der Einfluss von geringen Impedanzunterschieden zwischen den einzelnen Strompfaden der verwendeten Einspannvorrichtung auf die Stromaufteilung nur eine untergeordnete Rolle spielt.

Der Stromverlauf von jeweils drei gleichzeitig belasteten MO-Varistoren der „Größe 1“ bei Belastung mit einem Rechteckimpuls einer Scheiteldauer von 1,2 ms ist in *Abbildung 5.17* und bei Belastung mit einer Scheiteldauer von 5 ms in *Abbildung 5.18* dargestellt<sup>107</sup>. In beiden Abbildungen deuten die Pfeile die Tendenz des Verlaufes der Stromstärke während der Energieeinträge an. Während des Energieeintrags mit einer Scheiteldauer von 1,2 ms werden in die MO-Varistoren 1 und 2 jeweils etwa 220 J/cm<sup>3</sup> und in den MO-Varistor 3 etwa 340 J/cm<sup>3</sup> eingebracht. Dies führt zu Temperaturanstiegen der MO-Varistoren (bei Zugrundelegen der Materialparameter nach [Lat83]) um etwa 77 °C bzw. 116 °C. Bei dem längeren Energieeintrag mit einer Scheiteldauer von 5 ms werden versuchsbedingt hingegen nur etwa 150 J/cm<sup>3</sup> in den MO-Varistor 1, 170 J/cm<sup>3</sup> in den MO-Varistor 2 und 290 J/cm<sup>3</sup> in den MO-Varistor 3 eingebracht, was zu Temperaturerhöhungen um etwa 54 °C bzw. 100 °C führt. In beiden Diagrammen ist zu erkennen, dass sich die Stromaufteilung zwischen den MO-Varistoren während des Energieeintrags ändert. Die Stromdichte durch die MO-Varistoren 1 und 2 zeigt während des Energieeintrags in *Abbildung 5.17* eine ansteigende Tendenz, wohingegen die Stromdichte durch MO-Varistor 3 eine leicht fallende Tendenz

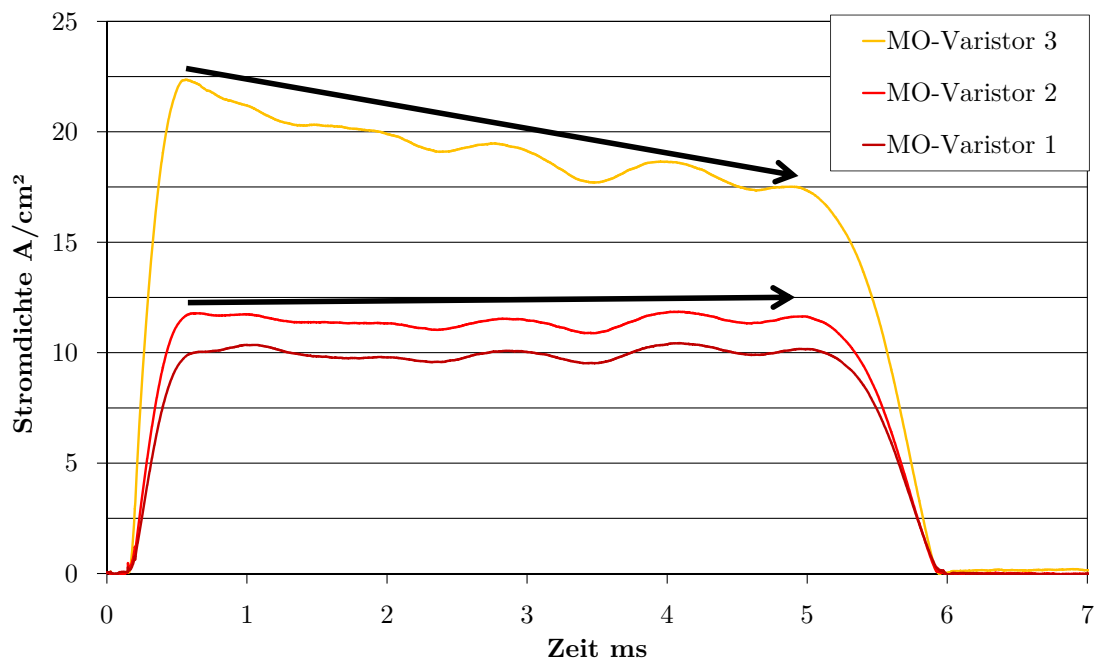
<sup>106</sup> Die drei Ströme werden jeweils mittels eines Stromwandlers der Firma „LEM“ des Typs „HAT 1500-S“ mit einer Genauigkeit von  $\pm 1\%$ , Linearität von  $\pm 1\%$  und einem Frequenzbereich von 0 kHz bis 25 kHz erfasst.

<sup>107</sup> Dieselben drei MO-Varistoren werden mit einem Rechteckimpuls mit einer Scheiteldauer von etwa 1,2 ms und 5 ms belastet. Die Stromdichteunterschiede zwischen den MO-Varistoren sind zur Verdeutlichung der Effekte höher gewählt als in praktischen Anordnungen, in denen Stromdichteunterschiede von bis zu 10 % zwischen MO-Varistorsäulen auftreten können.

## 5.2 Einfluss der Temperaturabhängigkeiten auf das Energieaufnahmevermögen



**Abbildung 5.17:** Stromverlauf von drei parallel belasteten MO-Varistoren bei einem Rechteckimpuls mit einer Scheiteldauer von 1,2 ms



**Abbildung 5.18:** Stromverlauf von drei parallel belasteten MO-Varistoren bei einem Rechteckimpuls mit einer Scheiteldauer von 5 ms

## 5 Impulsbelastbarkeit von MO-Varistoren

zeigt. In Abbildung 5.18 ist zu sehen, dass hier die Stromdichte durch die MO-Varistoren 1 und 2 während des Energieeintrags nur leicht ansteigt, während die Stromdichte durch den MO-Varistor 3 im Laufe des Energieeintrags deutlich zurück geht, was auch für den vom Rechteckimpulsgenerator bereitgestellten Summenstrom der Fall ist.

Betrachtet man die umgesetzte Energie<sup>108</sup> in den einzelnen Teilabschnitten des Energieeintrags, so wird im ersten Viertel des in Abbildung 5.17 dargestellten Rechteckimpulses im MO-Varistor 3 etwa 80 % mehr als im MO-Varistor 1 umgesetzt, wohingegen im letzten Viertel des Energieeintrags nur noch etwa 45 % mehr Energie im MO-Varistor 3 als im MO-Varistor 1 umgesetzt wird. In ähnlicher Weise ändert sich auch die Energieaufnahme während des in Abbildung 5.18 dargestellten Rechteckimpulses. Bei diesem wird im ersten Viertel des Rechteckimpulses etwa 117 % mehr Energie im MO-Varistor 3 als im MO-Varistor 1 umgesetzt, wohingegen im letzten Viertel nur noch etwa 52 % mehr im MO-Varistor 3 als im MO-Varistor 1 umgesetzt wird.

Offensichtlich wird der Unterschied zwischen den Stromdichten von MO-Varistor 1 (bzw. MO-Varistor 2) und MO-Varistor 3 im Verlauf der untersuchten Energieeinträge kleiner. Zu beachten ist, dass der Anstieg der Stromdichte der MO-Varistoren 1 und 2 wahrscheinlich nicht auf einen negativen Temperaturkoeffizienten des Widerstandes zurückzuführen ist, sondern vielmehr auf das veränderte Widerstandsverhältnis der MO-Varistoren untereinander. Da die Stromdichte durch den heißer werdenden MO-Varistor 3 sinkt, steigt der Anteil durch die weniger heiß werdenden MO-Varistoren 1 und 2. Dies kann, durch den Verlauf des vom Rechteckgenerator eingeprägten Gesamtstroms, zu einem absoluten Anstieg des Stromes durch die MO-Varistoren mit einem geringeren Temperaturanstieg führen.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung stützen die Erkenntnisse aus Kapitel 5.2.1, wonach im Durchbruchbereich der *UI*-Kennlinie bei einem erwärmten MO-Varistor höhere Spannungen benötigt werden, um den gleichen Strom einzuprägen, als bei dem selben MO-Varistor im kalten Zustand. Der Effekt zeigt sich unabhängig davon, ob die Wärmeenergie wie in Kapitel 5.2.1 von außen zugeführt wird oder wie in diesem Kapitel durch einen elektrischen Energieeintrag, der noch weitere Änderungen im MO-Varistor bewirkt. Trotzdem kann nicht von einem ausgeprägten „Selbstschutzeffekt“, der kleine Stromabweichungen im Laufe eines Energieeintrags durch den Temperatureffekt ausgleichen würde, gesprochen werden, da der Temperatureffekt zu geringe Auswirkungen auf die *UI*-Kennlinie hat. So ist davon auszugehen, dass die Temperaturabhängigkeit der *UI*-Kennlinie nur einen geringen positiven Effekt auf das Energieaufnahmevermögen bei dem Betrieb von mehreren parallelen

---

<sup>108</sup> Es ist zu beachten, dass (wie in den Abbildungen 4.5 zu sehen ist) während eines Energieeintrags mit einem Rechteckimpuls die Spannung an einem MO-Varistor ansteigt.



MO-Varistorsäulen oder bei der Beanspruchung mehrere paralleler Pfade innerhalb eines MO-Varistors hat.

### 5.2.3 Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen von MO-Varistoren bei erhöhter Umgebungstemperatur

Neben dem Einfluss der Temperaturabhängigkeit auf die Stromaufteilung während des Energieeintrags ist auch der Einfluss der aktuellen Temperatur eines MO-Varistors auf das Energieaufnahmevermögen von Interesse. Überspannungsableiter können nach hohen Energieeinträgen mehrere Stunden benötigen, um auf Umgebungstemperatur abzukühlen<sup>109</sup>, was die Belastbarkeit mit Mehrfachbelastungen einschränkt. Um abschätzen zu können, wie stark die Starttemperatur des MO-Varistors das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen je nach Stromdichte des Energieeintrags beeinflusst, wird die nachfolgende Untersuchung<sup>110</sup> durchgeführt.

Das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen wird bei drei verschiedenen Starttemperaturen 27 °C, 126 °C und 213 °C und bei zwei Stromdichten, bei 3,6 A/cm<sup>2</sup> mittels eines Wechselstromenergieeintrags und bei 177 A/cm<sup>2</sup> mittels eines Rechteckimpulses, bestimmt. Die Temperaturniveaus sind derart gewählt, dass sich die bei diesen in dem MO-Varistor gespeicherte Wärmeenergie<sup>111</sup> um den gleichen Wert von 290 J/cm<sup>3</sup> unterscheidet.

$$27\text{ °C} \xrightarrow{+290\text{ J/cm}^3} 126\text{ °C} \xrightarrow{+290\text{ J/cm}^3} 213\text{ °C}$$

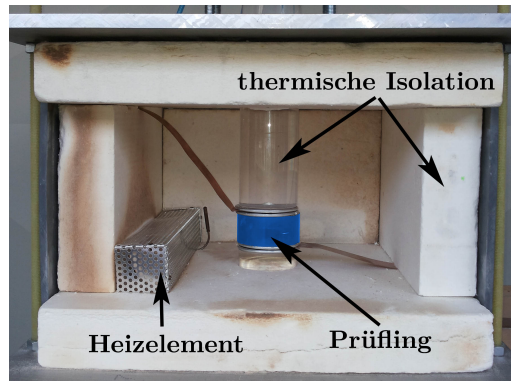
Alle Energieeinträge werden bis zur mechanischen Zerstörung der MO-Varistoren durchgeführt, und je Temperaturniveau einer Stromdichte werden jeweils 24 MO-Varistoren belastet. Die MO-Varistoren (sowie die Kontaktelektroden aus Aluminium) werden für mindestens 8 h in einem handelsüblichen Temperaturschrank vorgewärmt und in der temperierten Prüflingsaufnahme belastet, welche in *Abbildung 5.19* dargestellt ist. Die Temperatur des Prüflings wird in der Prüflingsaufnahme mittels eines Infrarotsensors<sup>112</sup> (in *Abbildung 5.19* vom Prüfling verdeckt) überwacht. Die Energieeinträge erfolgen, wenn sich sowohl die

<sup>109</sup> In [ABB11] wird für Überspannungsableiter in Mittelspannungsnetzen von einer Abkühlzeit von 45 min bis 60 min, abhängig von der Konstruktion und den Umgebungsbedingungen ausgegangen. Die Abkühlzeit für Überspannungsableiter in höheren Spannungsebenen ist deutlich länger, wie z. B. die Untersuchungen der studentischen Arbeiten [Mus09], [Dür10], [Kac11] und [Nur11] nahelegen.

<sup>110</sup> Die Untersuchung ist auch in der Bachelorarbeit [Sch13] dokumentiert und ausgewertet.

<sup>111</sup> Zur Bestimmung der gespeicherten Energie im MO-Varistor wird die Wärmekapazität (die Materialparameter sind [Lat83] entnommen) der MO-Varistoren über den Temperaturbereich der Vorwärmphase der Untersuchung integriert.

<sup>112</sup> Der verwendete Infrarotsensor des Typs „optris CS“ der Firma „Optris“ hat eine Genauigkeit von ±1,5 % bzw. ±1,5 °C.



**Abbildung 5.19:** Einspannvorrichtung zur Untersuchung des Einzelimpulsenergieaufnahmevermögens von temperierten MO-Varistoren

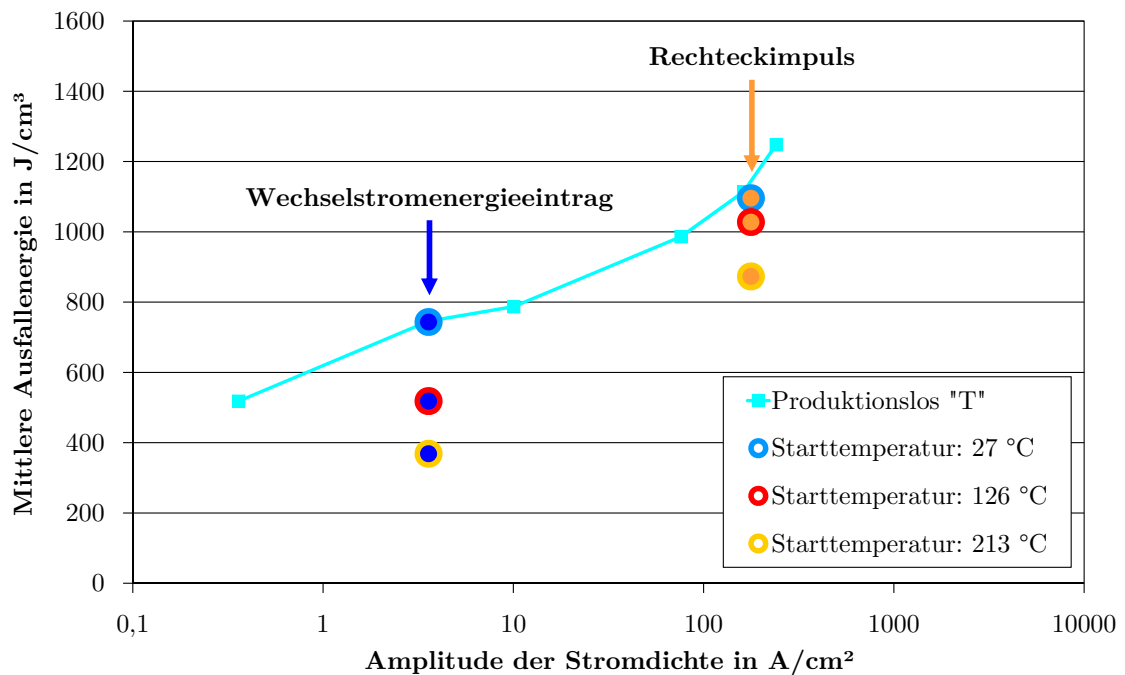
Lufttemperatur der Prüflingsaufnahme als auch die Prüflingstemperatur in einem Intervall von  $\pm 5$  K um den Sollwert befinden.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind im Vergleich zu den zuvor in Kapitel 5.1 dargestellten Ergebnissen an den MO-Varistoren des Produktionsloses „T“ (bei gleichem Fehlerkriterium) in *Abbildung 5.20* dargestellt. Die Standardabweichung der Ausfallenergien der Untersuchungen bei erhöhter Starttemperatur liegt im Bereich von 10 % der jeweiligen mittleren Ausfallenergie. Es ist zu erkennen, dass die mittlere Ausfallenergie mit zunehmender Starttemperatur abnimmt. Somit können, wie zu erwarten war, vorgewärmte MO-Varistoren weniger elektrische Energie durch einen Einzelimpulsenergieeintrag aufnehmen als kältere. Weiterhin ist zu erkennen, dass die mittlere Ausfallenergie bei einer Starttemperatur der MO-Varistoren von  $213^\circ\text{C}$  bei einem Wechselstromenergieeintrag mit einer Stromdichte von  $3,6\text{ A/cm}^2$  um etwa die Hälfte reduziert wird. Bei einem Energieeintrag mittels eines Rechteckimpuls einer Stromdichte von  $177\text{ A/cm}^2$  hingegen sinkt diese nur um etwa 20 %. Die Ergebnisse liegen in einem ähnlichen Bereich wie die der Untersuchungen von [Kan83]. Dieser hatte für Rechteckimpulsbelastungen mit einer Scheiteldauer von 2 ms bis zu einer Starttemperatur von  $100^\circ\text{C}$  keine Abnahme und zwischen  $100^\circ\text{C}$  und  $200^\circ\text{C}$  eine Abnahme des Einzelimpulsenergieaufnahmevermögens von etwa 40 % festgestellt.

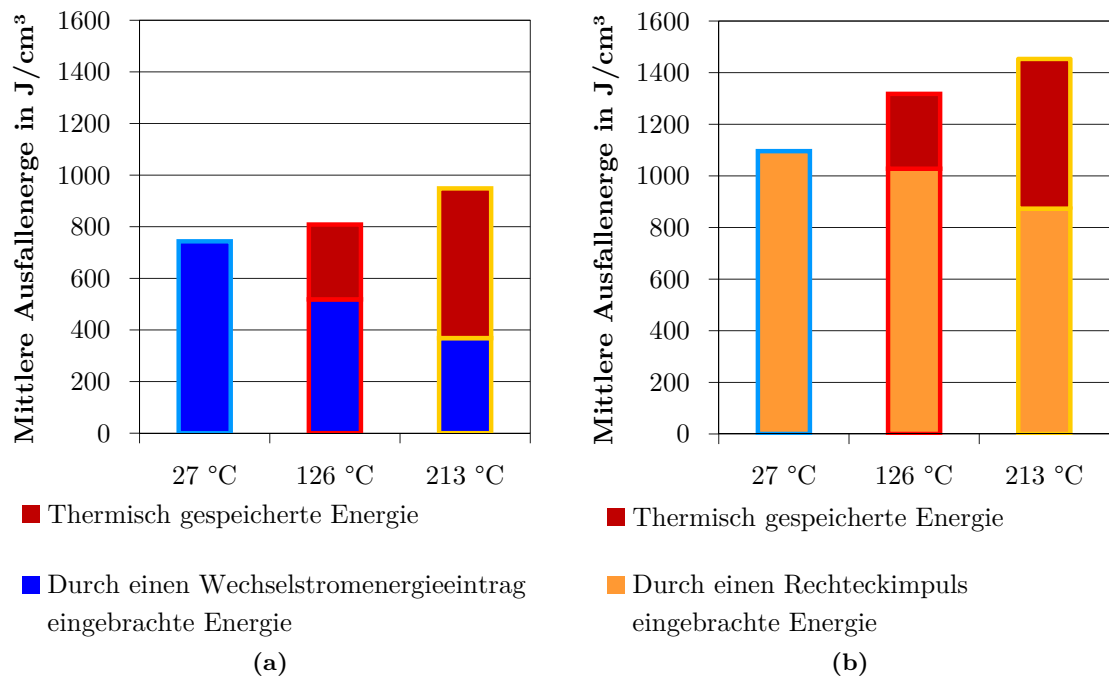
Zum Vergleich ist die mittlere Ausfallenergie zuzüglich der im MO-Varistor gespeicherten thermischen Energie (ab Umgebungstemperatur) in *Abbildung 5.21* für beide Energieeintragsarten dargestellt<sup>113</sup>. Die gespeicherte thermische Energie wird wie erwähnt durch Integration der Wärmekapazität der MO-Varistoren (nach [Lat83]) über den Temperaturbereich ab Umgebungstemperatur bestimmt. Es ist zu erkennen, dass die Summe aus

<sup>113</sup> In *Abbildung 5.20* und *Abbildung 5.21* kennzeichnen die Kantenfarben die Temperaturen der Prüflinge vor dem Energieeintrag und die Farben der Flächen die Energieeintragsarten.

## 5.2 Einfluss der Temperaturabhängigkeiten auf das Energieaufnahmevermögen



**Abbildung 5.20:** Mittlere Ausfallenergien der temperierten MO-Varistoren im Vergleich zu früheren Untersuchungen (siehe Kapitel 5.1) bei Umgebungstemperatur



**Abbildung 5.21:** Mittlere Ausfallenergie zuzüglich der thermisch gespeicherten Energie für: (a) die Wechselstromenergieeinträge und (b) den Energieeintrag mittels eines Rechteckimpulses

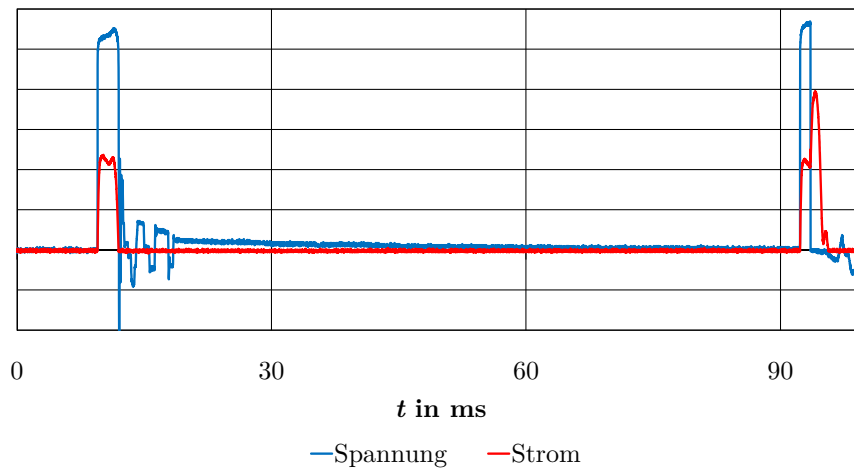
thermisch gespeicherter und elektrisch eingebrachter Energie in allen Fällen das für Umgebungstemperatur ermittelte Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen übersteigt. Bei den Wechselstromenergieeinträgen mit einer Stromdichte von  $3,6 \text{ A/cm}^2$  ist die Summe aus thermisch eingebrachter und elektrisch einbringbarer Energie bei einer Starttemperatur von  $213^\circ\text{C}$  um etwa 28 % höher als die bei Umgebungstemperatur elektrisch einbringbare Energie. Bei dem Energieeintrag mittels eines Rechteckimpulses mit einer Stromdichte von  $177 \text{ A/cm}^2$  sind es im gleichen Fall etwa 33 %. Die Ausfallbilder der belasteten MO-Varistoren unterscheiden sich jedoch nicht signifikant zwischen den Untersuchungen mit unterschiedlichen Starttemperaturen.

Im Falle einer thermischen Erwärmung über mehrere Stunden wird die Energie gleichmäßig in dem MO-Varistor verteilt, wohingegen bei einem elektrischen Energieeintrag diese durch Strompfadbildung etc. inhomogen umgesetzt wird. Die Zeitdauer der Energieeinträge ist mit einer Scheiteldauer von 1,9 ms für den Rechteckimpuls und etwa 100 ms für den Wechselstromenergieeintrag sehr kurz, sodass der Wärmeausgleich<sup>114</sup> innerhalb des MO-Varistors sehr begrenzt ist. Der prozentuale Unterschied zwischen der Summe aus thermisch eingebrachter zuzüglich der bei einer Starttemperatur von  $213^\circ\text{C}$  noch elektrisch einbringbarer Energie, sowie der bei Umgebungstemperatur elektrisch einbringbaren Energie, liegt für beide untersuchten Stromdichten im gleichen Bereich (28 % bzw. 33 %). Somit kann aus den Untersuchungen dieses Abschnittes geschlossen werden, dass für das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen die Stromaufteilung aufgrund der Mikrostruktur des MO-Varistors maßgebend ist und die Temperaturabhängigkeit der *UI*-Kennlinie nur eine untergeordnete Rolle spielt.

### 5.3 Doppelimpulsbelastbarkeit von MO-Varistoren

Überspannungsableiter können im Betrieb durch multiple Energieeinträge (siehe Kapitel 2.3), z. B. durch Folgeblitzbeanspruchungen oder Rückzündungen von Leistungsschaltern, in Zeitabständen  $< 1 \text{ ms}$  belastet werden (siehe z. B. [Cig13a] und [Cig13b]), und auch in Normprüfungen wie nach [IEEC62.11-2012], [IEC60099-4] und [IEC-37/416/FDIS] werden Rechteckimpulse im zeitlichen Abstand von unter 60 s eingebracht. Trotz der hohen praktischen Relevanz beschränken sich die Veröffentlichungen über Mehrfachbelastungen hauptsächlich auf Belastungen mit Doppel exponentialstoßströmen, die für Überspannungsableiter, die in der Mittelspannungsebene eingesetzt werden, besonders interessant sind (siehe z. B. [Dar97], [Den98] und [Kle04]). Diese Belastungen weisen hohe Stromdichten und

<sup>114</sup> Es konnte durch computergestützte Simulationen gezeigt werden, dass sich eine Wärmefront innerhalb von 100 ms nur deutlich weniger als 1 mm weit in einem MO-Varistor ausbreiten kann.



**Abbildung 5.22:** Oszillogramm von Spannung und Strom (jeweils anonymisiert) bei einer zerstörenden Belastung eines MO-Varistors mittels eines Doppelimpulses aus zwei Rechteckimpulsen im Abstand von etwa 80 ms

Stromsteilheit, jedoch verhältnismäßig geringe Energieinhalte auf. Rechteckimpulsbelastungen mit hohem Energieinhalt stellen für MO-Varistoren, die in den Hochspannungsebenen eingesetzt werden, eine relevantere Belastung dar. Um die Mehrfachimpulsbelastbarkeit von der Einzelimpulsbelastbarkeit mit Rechteckimpulsen abzugrenzen, wird die nachfolgende Untersuchung durchgeführt.

Für diese Untersuchungen wird der Rechteckimpulsgenerator aus Kapitel 4.3 in zwei parallele Generatoren aufgeteilt, die unabhängig von einander einen Rechteckimpuls mit einer Scheiteldauer von 1,9 ms erzeugen können. Das Prinzipschaltbild dieser Anordnung ist Abbildung A.4 zu entnehmen.

Ein Beispiel eines so erzeugten Doppelimpulses aus zwei Rechteckimpulsen im Abstand von etwa 80 ms ist in *Abbildung 5.22* dargestellt. In diesem Beispiel fällt der MO-Varistor während des zweiten Energieeintrags mechanisch aus, was einen Spannungszusammenbruch und nahezu eine Verdopplung des Stromes<sup>115</sup> zur Folge hat.

Zur Untersuchung des Doppelimpulsenergieaufnahmevermögens werden MO-Varistoren mit zwei Rechteckimpulsen einer Länge von jeweils 1,9 ms mit einem zeitlichen Abstand der Auslösung von 80 ms bzw. 3 s belastet<sup>116</sup>. Da grundsätzlich unbekannt ist, ob die *UI*-Kennlinie der belasteten MO-Varistoren durch die Doppelbelastung stärker als durch eine

<sup>115</sup> Der Strom schwingt nach der Zerstörung des MO-Varistors nicht aus, da der zweite Rechteckimpuls über einen Halbleiterschalter bestehend aus Thyristoren ausgelöst wird. Dieser unterdrückt den Polaritätswechsel des Stromes.

<sup>116</sup> Es wurden keine längeren Zeitabstände als 3 s untersucht, um den Einfluss des Wärmeabgabeverhaltens des MO-Varistors an die Umgebung und die Versuchsanordnung zu begrenzen.

**Tabelle 5.2:** Übersicht über die Doppelimpulsbelastbarkeit mit Rechteckimpulsen von MO-Varistoren im Vergleich zu der Einfachimpulsbelastbarkeit. Für die Untersuchungen wurde das „komplexe Fehlerkriterium“ (wie in Abbildung 5.1 dargestellt) angewendet.

Scheiteldauer/Zeitabstand	Doppelimpuls		Einzelimpuls	
	1,9 ms/3 s	1,9 ms/80 ms	3,9 ms/-	1,9 ms/-
Mittlere Stromdichte in A/cm <sup>2</sup>	70	70	75	131
Mittlere (Summen-) Ausfallenergie in p. u.	0,95	0,95	1,00 <sup>a</sup>	0,94
Variationskoeffizient	0,21	0,15	0,17	0,11

<sup>a</sup> Bezugswert

Einzelbelastung beeinflusst wird, wird die erste der nachfolgend vorgestellten Versuchsreihen unter Anwendung des „komplexen Fehlerkriteriums“ (wie in Abbildung 5.1 dargestellt) durchgeführt. Hierbei werden MO-Varistoren der „Größe 2“ eines Produktionsloses belastet. Für die Untersuchungen bis zur mechanischen Zerstörung der MO-Varistoren werden MO-Varistoren der „Größe 2“ eines anderen Produktionsloses verwendet.

Die Ergebnisse der Untersuchung des Doppelimpulsenergieaufnahmevermögens im Vergleich zum Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen (beides unter Verwendung des „komplexen Fehlerkriteriums“) sind in *Tabelle 5.2* dargestellt<sup>117</sup>. Die mittlere Stromdichte der einzelnen Energieeinträge hat für die Doppelimpulse jeweils den gleichen Wert von 70 A/cm<sup>2</sup>. Der Wert der Stromdichte für den Einzelimpuls mit einer Scheiteldauer von 3,9 ms liegt mit 75 A/cm<sup>2</sup> etwas höher als bei den Doppelimpulsbelastungen. Die mittlere Stromdichte des Rechteckimpulses mit einer Scheiteldauer von 1,9 ms weist hingegen mit 131 A/cm<sup>2</sup> fast den doppelten Wert auf, da hier etwas weniger als die halbe Scheiteldauer zum Einbringen der Energie eingesetzt wird. Für die mittlere Ausfallenergie der Doppelimpulsbelastungen ist die Summe aus erstem und zweiten Energieeintrag angegeben. Diese ist auf die mittlere Ausfallenergie des Rechteckimpulses mit einer Scheiteldauer von 3,9 ms bezogen. Für die Doppelimpulse unterscheidet sich diese nur gering von der der Einzelimpulsenergieeinträge mit 1,9 ms Scheiteldauer. Der Unterschied zum Energieeintrag mit einer Scheiteldauer von 3,9 ms ist unter Berücksichtigung der Variationskoeffizienten<sup>118</sup> ebenfalls gering. Die Betrachtung der Ausfallmechanismen zeigt innerhalb dieser Untersuchung keinen Unterschied zwischen den Doppel- und den Einfachimpulsbelastungen desselben Produktionsloses, wie sie in in Abbildung 5.8 dargestellt sind.

<sup>117</sup> Die Ergebnisse sind auch in der Studienarbeit von [Gie11] dokumentiert und ausgewertet.

<sup>118</sup> Der Variationskoeffizient ist eine statistische Kenngröße, die als Standardabweichung dividiert durch den Mittelwert definiert ist (siehe z. B. [Leh85]).

**Tabelle 5.3:** Übersicht über die Doppelimpulsbelastbarkeit mit Rechteckimpulsen von MO-Varistoren im Vergleich zu der Einfachimpulsbelastbarkeit. Für die Untersuchungen wurden die MO-Varistoren bis zur mechanischen Zerstörung belastet.

Scheiteldauer/Zeitabstand	Doppelimpuls		Einzelimpuls	
	1,9 ms/3 s	1,9 ms/80 ms	3,9 ms/-	1,9 ms/-
Mittlere Stromdichte in A/cm <sup>2</sup>	106	111	111	233
Mittlere (Summen-) Ausfallenergie in p. u.	1,04	1,02	1,00 <sup>a</sup>	1,02
Variationskoeffizient	0,09	0,12	0,07	0,10

<sup>a</sup> Bezugswert

Als Zwischenergebnis lässt sich festhalten, dass die festgestellten Unterschiede in der Ausfallenergie zwischen den Einfach- und den Mehrfachimpulsbelastungen so gering sind, dass sie bei dem Variationskoeffizienten von 0,11 bis 0,21 nicht auflösbar sind. Da die Doppelimpulsbelastung zu vergleichbaren Fehlerverteilungen wie bei den Einfachimpulsen desselben Produktionsloses führen, scheint die Anwendung des komplexen Fehlerkriteriums keine Zusatzinformationen zu liefern. Um die Versuchsergebnisse an den MO-Varistoren eines zweiten Produktionsloses mit einer höheren Ausfallenergie zu verifizieren sowie den Variationskoeffizienten zu verringern, wird die Versuchsreihe an einem weiteren Produktionslos wiederholt, wobei jedoch nicht das „komplexe Fehlerkriterium“ angewandt, sondern die MO-Varistoren bis zum mechanischen Ausfall belastet werden. Die Versuchsergebnisse sind in der *Tabelle 5.3* dokumentiert<sup>119</sup>.

Auch bei dieser Versuchsreihe ist zu erkennen, dass die mittlere eingeprägte Stromdichte der Doppelimpulse mit 106 A/cm<sup>2</sup> bis 111 A/cm<sup>2</sup> im gleichen Bereich wie die der Einzelimpulsbelastung mit 111 A/cm<sup>2</sup> einem Rechteckimpuls mit einer Scheiteldauer von 3,9 ms liegt. Die mittlere Stromdichte der Einzelimpulsbelastungen bei einer Scheiteldauer von 1,9 ms liegt dagegen mit 233 A/cm<sup>2</sup> wieder bei dem doppelten Wert. Die mittleren (Summen-) Ausfallenergien differieren nur unwesentlich unter Berücksichtigung des Variationskoeffizienten von 0,07 bis 0,12 (der sich durch das geänderte Fehlerkriterium gering reduziert). Auch in dieser Untersuchung unterscheiden sich die Ausfallbilder der MO-Varistoren die mit unterschiedlichen Zeitabständen belastet wurden nicht signifikant. Somit bestätigt die zweite Untersuchung die Ergebnisse der ersten Untersuchung dieses Abschnitts.

Aus beiden Untersuchungen lässt sich schlussfolgern, dass das Energieaufnahmevermögen bei Rechteckimpulsbelastungen im betrachteten Bereich zwischen Einzel- und Doppelimp-

<sup>119</sup> Die Ergebnisse sind auch in [Tuc13a] dargestellt.

pulsbelastungen mit Zeitdifferenzen der Auslösung von bis zu 3 s nicht signifikant variiert. Die Versuchsergebnisse deuten darauf hin, dass die Wärmeverteilung im MO-Varistor durch ungleichmäßige Stromverteilung nach einer ersten Rechteckimpulsbelastung (mit der betrachteten Stromdichte) innerhalb eines Zeitraums von 3 ms nicht wesentlich verbessert wird. Dies könnte entweder darin begründet sein, dass die Zeitdauer zu kurz ist, oder dass die Wärmeverteilung nicht so stark ausgeprägt ist, dass sie einen signifikanten Einfluss hätte. Die Ergebnisse aus Kapitel 5.2.3 sprechen dafür, dass die ungleichmäßige Wärmeverteilung nach einer Rechteckimpulsvorbelastung im betrachteten Bereich der Stromdichte nur gering ausgeprägt ist und deshalb der Unterschied im Energieaufnahmevermögen zwischen Doppelimpulsbelastungen und Einfachimpulsbelastungen im gleichen Bereich der Stromdichte gering ist.

Dementsprechend müssen bei Betrachtungen zu der Belastbarkeit mit Mehrfachimpulsen kurzen Zeitabstandes im betrachteten Bereich der Stromdichte die einzelnen Energieeinträge aufsummiert werden. Es darf vermutet werden, dass dieses Vorgehen für beliebige Zeitabstände zwischen den Belastungen gültig ist, solange keine nennenswerte Wärmeenergie vom MO-Varistor abgegeben werden kann<sup>120</sup>. Im „Single-impulse withstand rating test“ in [IEEC62.11-2012] und im „Test to verify the repetitive charge transfer rating“ in [IEC-37/416/FDIS]<sup>121</sup> werden die MO-Varistoren durch zwei aufeinanderfolgende Impulse im Zeitabstand von 50 s bis 60 s geprüft. Die beschriebenen Ergebnisse deuten darauf hin, dass abhängig davon, wie stark die Prüflingsaufnahmen<sup>122</sup> Wärme von den geprüften MO-Varistoren abführen, diese in diesen Normprüfungen einer Belastung ausgesetzt werden, die im Bereich von zwei einzelnen Energieeinträgen bis hin zu einem Energieeintrag mit dem Doppelten des spezifizierten Energieinhaltes liegt. Empfehlungen zur Weiterentwicklung der Norm werden in Kapitel 6.2 vorgestellt.

## 5.4 Belastbarkeit von MO-Varistoren mit repetierenden Energieeinträgen

Nach der Darstellung des Einzelimpulsenergieaufnahmevermögens und der Abgrenzung zur Mehrfachimpulsbelastbarkeit mittels der Untersuchungen zum Doppelimpulsenergieauf-

<sup>120</sup> Ab welchem Zeitpunkt dies der Fall ist, hängt weniger vom MO-Varistor als vielmehr vom Design der Prüfaufnahme bzw. des realen Überspannungsableiters ab, weshalb der exakte Zeitpunkt in dieser allgemeinen Betrachtung nicht weiter untersucht werden kann.

<sup>121</sup> In [IEC60099-4] wird die Impulsbelastbarkeit mit 18 Energieeinträgen in sechs Gruppen zu je drei Impulsen, die jeweils im Abstand von 50 s bis 60 s durchgeführt werden (zwischen den Belastungen werden die MO-Varistoren auf Umgebungstemperatur abgekühlt), abgeprüft.

<sup>122</sup> Die Prüflingsaufnahme ist in den genannten Normen nicht weiter spezifiziert.



nahmevermögen werden in diesem Abschnitt Untersuchungen zur Belastbarkeit von MO-Varistoren mit repetierenden Energieeinträgen dargestellt. Als repetierende Belastungen werden wiederholte Belastungen bezeichnet, zwischen denen die Prüflinge auf Umgebungstemperatur abkühlen. Die Eigenschaften von Energieeinträgen, die eine Ermüdung bzw. Degradation von MO-Varistoren bei repetierenden Belastungen hervorrufen, sollen in diesem Abschnitt eingegrenzt werden.

Die Varianzen von repetierenden Belastungen sind groß, wenn man die unterschiedlichen Arten, Wechselwirkungen, Anzahl der Belastungen, Höhe, Polarität (Polaritätswechsel) der Stromdichte sowie unterschiedliche sich unter Umständen gegenseitig beeinflussende oder auch teilweise zerstörende Ausgangsmessungen in Betracht zieht. Da die Untersuchung von repetierenden Belastungen (speziell bei Berücksichtigung von hohen Belastungshäufigkeiten) sehr aufwändig ist, können nur geringere Stückzahlen der Prüflinge und weniger Produktionslose<sup>123</sup> als bei der Prüfung des Einzelimpulsenergieaufnahmevermögens untersucht werden. Dies schränkt u. a. die Auswertungsmöglichkeit der Ausfallbilder der belasteten MO-Varistoren ein.

Das Verhalten bei repetierenden Belastungen mit gleichen Eigenschaften (Belastungsform, Stromdichte, Polarität etc.) wird im Folgenden bei bis zu 100 Belastungen grundlegend untersucht. Daran anschließend werden einzelne Parameter variiert, um deren Einfluss bestimmen zu können. Zur Charakterisierung des Ermüdungsverhaltens wird (wie beim Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen) die „charakteristische Spannung“ im Vordurchbruchbereich der *UI*-Kennlinie und in einigen Fällen die Restspannung im Durchbruchbereich der *UI*-Kennlinie der vorbelasteten MO-Varistoren bestimmt. Zusätzlich wird das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen, bei Belastung bis zur Zerstörung des Prüflings, nach den repetierenden Belastungen ausgewertet. Alle vorgestellten Untersuchungen (mit Ausnahme der Untersuchungen in Kapitel 5.4.4 und Kapitel 5.5) werden an MO-Varistoren der „Größe 1“ durchgeführt.

### 5.4.1 Mehrfachbelastbarkeit mit Wechselstromenergieeinträgen

Repetierende Wechselstromenergieeinträge können vor allem in Überspannungsableiterbänken zum Schutz von Serienkondensatoren auftreten (siehe Kapitel 2.1). Aber auch in der UHV-Spannungsebene werden Überspannungsableiter verstärkt mit zeitweiligen Überspannungen und damit auch mit Wechselstromenergieeinträgen nennenswert belastet (siehe z. B. [Hin12]). Dies liegt daran, dass in diesem Anwendungsbereich extrem

<sup>123</sup> Die verwendeten Stückzahlen und die Anzahl der Produktionslose wird in den entsprechenden Abschnitten genannt.

niedrige Schutzpegel verwendet werden, die die gesamte  $UI$ -Kennlinie hin zu höheren Leckströmen verschieben (siehe z. B. [Hin12]). Ziel der in diesem Abschnitt vorgestellten Untersuchung<sup>124</sup> ist es, das Wissen über die Belastungsfähigkeit von MO-Varistoren mit repetierenden Wechselstromenergieeinträgen zu erhöhen.

Zur Untersuchung der Belastungsfähigkeit werden je zehn MO-Varistoren aus drei verschiedenen Produktionslosen<sup>125</sup> (mit „I“, „II“ und „III“ gekennzeichnet) mit jeweils 100 Wechselstromenergieeinträgen belastet. Das Ablaufdiagramm der Untersuchung ist in *Abbildung 5.23* dargestellt und zeigt, dass zunächst alle MO-Varistoren einer Eingangsmessung, in der die „charakteristische Spannung“ bei einem Scheitelwert der Stromdichte von  $0,12 \text{ mA/cm}^2$  gemessen wird, unterzogen werden. Da die für die Restspannungsmessung verwendeten Blitzstoßströme im Vergleich zu den für die Vorbelastung verwendeten Wechselstromenergieeinträgen verhältnismäßig hohe Stromsteilheiten und Stromscheitelwerte aufweisen, könnte eine Restspannungsmessung die MO-Varistoren stärker verändern als die verwendeten Vorbelastungen. Aus diesem Grund wird in dieser Messreihe keine Restspannungsmessung zur Ein- und Ausgangsmessung durchgeführt.

Im Anschluss an die Eingangsmessung wird eine Vorbelastung mit einem Wechselstromenergieeintrag mit einer betriebsfrequenten Wechselspannung von 50 Hz bei einer Stromdichte von  $3,5 \text{ A/cm}^2$  durchgeführt. Die Länge des Energieeintrags ist so gewählt, dass die eingebrachte Energie der Vorbelastung etwa 80 % des mittleren Einzelimpulsenergieaufnahmevermögens<sup>126</sup> der jeweiligen MO-Varistoren (siehe Kapitel 5.1) beträgt. Dies führt zu Energieeinträgen der Vorbelastung von etwa  $600 \text{ J/cm}^3$  bis  $700 \text{ J/cm}^3$ , die durch Wechselstromenergieeinträge mit einer Dauer von 200 ms bis 300 ms eingebracht werden. Nach der Vorbelastung werden die MO-Varistoren durch Fremdkühlung innerhalb von etwa 15 min auf Umgebungstemperatur abgekühlt. Die Abkühlzeit ist im Vergleich zur Aufheizzeit durch den Energieeintrag verhältnismäßig lang. Aus diesem Grund darf vermutet werden, dass die mechanischen Spannungen im MO-Varistor durch den Abkühlprozess im Vergleich zu denen des Aufheizprozesses vernachlässigbar gering sind.

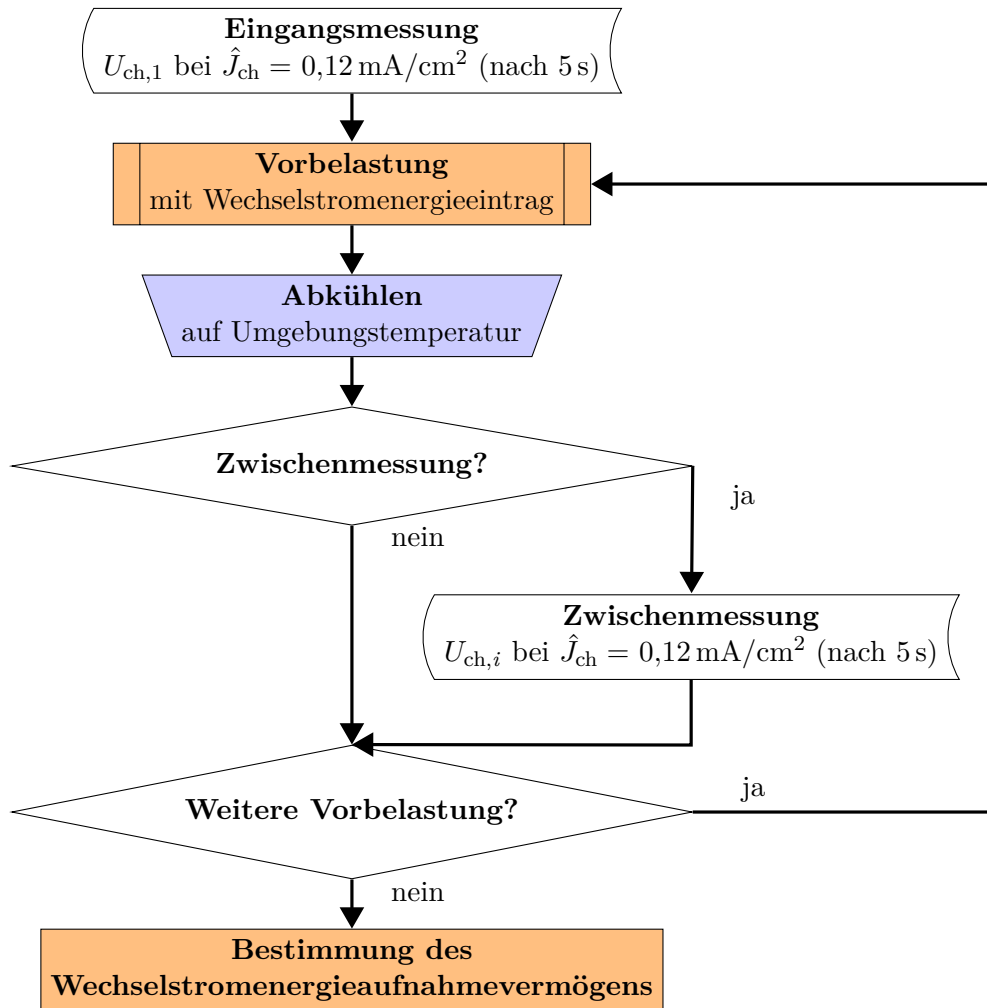
Nach jeder fünften Vorbelastung<sup>127</sup> wird mit Hilfe einer Zwischenmessung die Veränderung der „charakteristischen Spannung“ aufgrund der Vorbelastungen bestimmt. Im Anschluss

<sup>124</sup> Die Untersuchungsergebnisse sind auch in [Tuc13a] dargestellt.

<sup>125</sup> Die Ergebnisse eines Produktionsloses sind auch in der Studienarbeit [Gol09] dokumentiert und ausgewertet.

<sup>126</sup> Es wird 80 % des mittleren Einzelimpulsenergieaufnahmevermögens verwendet, da weitere Auswertungen der Ergebnisse aus Kapitel 5.1 zeigen, dass bei diesem Wert die Ausfallwahrscheinlichkeit bei einem einfachen Energieeintrag produktionslosübergreifend unter 0,01 % liegt.

<sup>127</sup> Es wird nur nach jeder fünften Vorbelastung eine Zwischenmessung durchgeführt, da der Aufwand, nach jeder Vorbelastung eine Zwischenmessung durchzuführen, durch den Erkenntnisgewinn nicht zu rechtfertigen ist.



**Abbildung 5.23:** Ablaufdiagramm der repetierenden Belastungen mit Wechselstromenergieeinträgen (nach [Tuc13a])

daran wird die nächste Vorbelastung durchgeführt.

Nach 100 Vorbelastungen wird an diejenigen MO-Varistoren, die nach dieser Belastung keine mechanischen makroskopischen Schäden zeigen, das Energieaufnahmevermögen durch einen Wechselstromenergieeintrag mit einer Stromdichte von  $3,5 \text{ A/cm}^2$  bestimmt. Hierbei werden die MO-Varistoren bis zur mechanischen Zerstörung belastet und der ermittelte Energieeintrag mit dem Energieaufnahmevermögen von fabrikneuen MO-Varistoren verglichen. Es wird ein Wechselstromenergieeintrag mit einer Stromdichte von  $3,5 \text{ A/cm}^2$  gewählt, da dieser nach den Untersuchungen in Kapitel 5.1 (siehe Abbildung 5.5) als besonders sensitiv eingestuft wird. Außerdem liegt für kleine Stromdichten das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen verhältnismäßig nahe am Nennenergieaufnahmevermögen von Standard-

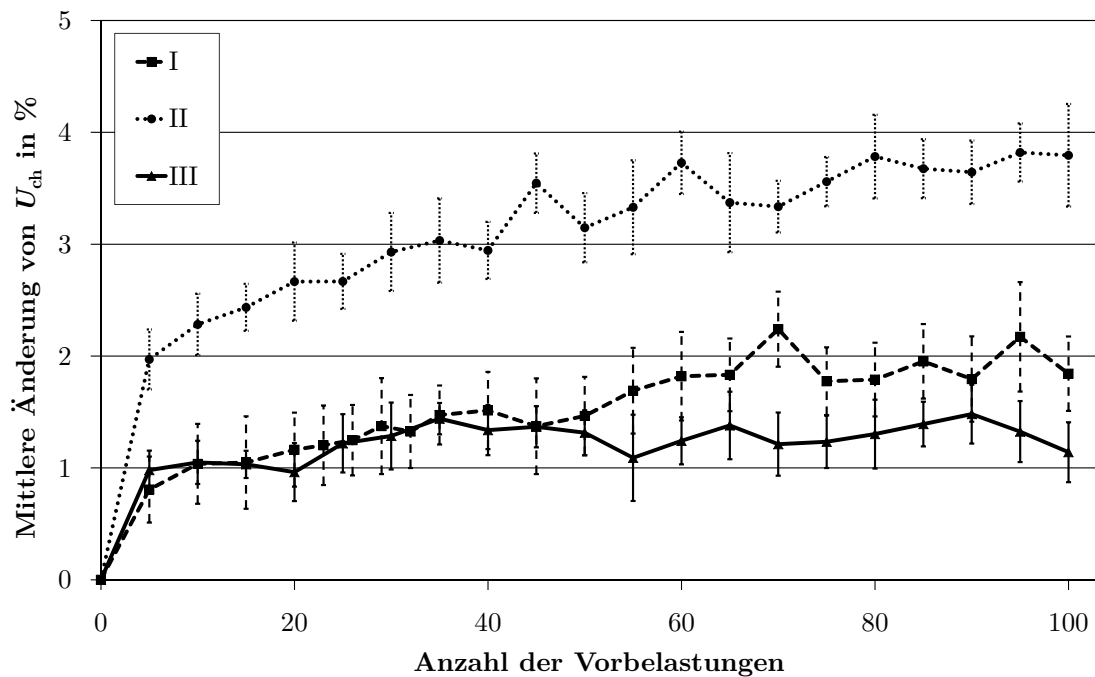
Überspannungsableitern, weshalb Änderungen des Energieaufnahmevermögens in diesem Stromdichtebereich als besonders kritisch eingestuft werden.

Der Mittelwert und die Standardabweichung der Änderung der „charakteristischen Spannung“ durch repetierende Wechselstromenergieeinträge bei einem Energieeintrag, der 80 % des mittleren Einzelimpulsenergieaufnahmevermögens entspricht, ist für die MO-Varistoren der drei untersuchten Produktionslose in *Abbildung 5.24* dargestellt. Für alle drei untersuchten Produktionslose steigt die „charakteristische Spannung“ infolge der Vorbelastungen an, d. h. es wird im Vordurchbruchbereich der *UI*-Kennlinie mehr Spannung benötigt, damit die MO-Varistoren die gleiche Stromdichte führen. Dies stellt eine Verbesserung der *UI*-Kennlinie im Sinne der thermischen Stabilität eines Überspannungsableiters dar. Der Anstieg der „charakteristischen Spannung“ scheint sich nach einer gewissen Anzahl von Belastungen (je nach Produktionslos) einem Grenzwert zu nähern. Dieser Grenzwert scheint nach 100 Vorbelastungen je nach Produktionslos im Bereich von 1 % bis 4 % zu liegen. Es ist zu vermuten, wenngleich der Beweis bislang noch nicht erbracht ist, dass durch die repetierenden Wechselstromenergieeinträge bzw. die durch diese hervorgerufene Erwärmung die Änderungen der *UI*-Kennlinie der MO-Varistoren, die durch die Stückprüfungen der Hersteller hervorgerufen wurden, reduziert wird. Hierbei wird die durch hohe Stromscheitelwerte und Stromsteilheiten (bspw. durch die Restspannungsmessung) erzeugte Degradation in Form von Sauerstoffmigrationen durch Diffusionsvorgänge zurückgebildet (vgl. [Den98] und [Stu90]). Letzterer Prozess wird durch die erhöhte Temperatur infolge eines Energieeintrags unterstützt (siehe hierzu auch Kapitel 5.5.2).

Keiner der zehn MO-Varistoren des Produktionsloses „I“ fällt während der 100 Wechselstromvorbelastungen aus. Hingegen fallen von dem Produktionslos „II“ drei (während der Vorbelastung 4, 45 und 50)<sup>128</sup> und vom Produktionslos „III“ einer (während der 40. Vorbelastung) von jeweils zehn MO-Varistoren aus. Keiner der ausgefallenen MO-Varistoren zeigte vor dem Ausfall Auffälligkeiten, wie deutliche Änderungen der „charakteristischen Spannung“ oder ähnliches. Es muss jedoch eingeschränkt werden, dass auch keiner der MO-Varistoren in einer Vorbelastung direkt nach einer Zwischenmessung ausfiel.

In *Tabelle 5.4* ist das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen nach 100 Vorbelastungen (der MO-Varistoren, die der Vorbelastung standhielten) bezogen auf das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen von fabrikneuen MO-Varistoren (siehe Kapitel 5.1), geprüft mit einer Wechselstrombelastung bei einer Stromdichte von  $3,5 \text{ A/cm}^2$ , dargestellt. Die mittlere Ausfallenergie liegt etwa 10 % bis 20 % höher als bei fabrikneuen MO-Varistoren des gleichen Produktionsloses, wobei der Variationskoeffizient von 0,014 bis 0,038 variiert.

<sup>128</sup> Ein MO-Varistor musste während der Versuchsreihe aufgrund von unsachgemäßer Behandlung aussortiert werden.



**Abbildung 5.24:** Änderung der charakteristischen Spannung durch repetierende Wechselstromenergieeinträge (nach [Tuc13a])

Die Auswertung der Ausfallbilder der belasteten MO-Varistoren zeigt keine nennenswerten Unterschiede zu denen nach Einzelimpulsbelastungen.

Es ist nicht davon auszugehen, dass die Vorbelastungen das Energieaufnahmevermögen der belasteten MO-Varistoren real erhöht haben. Vielmehr ist zu vermuten, dass der vermeintliche Anstieg auf das Ausfallen von MO-Varistoren mit geringerem Energieaufnahmevermögen während der Vorbelastungen zurückzuführen ist. Solche MO-Varistoren senken das ermittelte mittlere Energieaufnahmevermögen während der Einzelimpulsuntersuchungen in Kapitel 5.1. Vergleichbare MO-Varistoren fallen jedoch während der Vorbelastungen mit Wechselstromenergieeinträgen aus, weshalb sie die mittlere Ausfallenergie der vorbe-

**Tabelle 5.4:** Wechselstromenergieaufnahmevermögen der MO-Varistoren nach 100 Wechselstromvorbelastungen im Vergleich zum Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen von fabrikkneuen MO-Varistoren bei der gleichen Stromdichte (nach [Tuc13a])

Produktionslos	„I“	„II“	„III“
Anzahl der geprüften MO-Varistoren	10	6	9
Mittlere Ausfallenergie in p. u.	1,1	1,1	1,2
Variationskoeffizient	0,038	0,014	0,029

lasteten MO-Varistoren nicht reduzieren. Mit Sicherheit kann festgehalten werden, dass die untersuchten Wechselstromenergieeinträge mit einem Energieinhalt von etwa 80 % des mittleren Einzelimpulsenergieaufnahmevermögens das Energieaufnahmevermögen der MO-Varistoren nicht beeinträchtigen. Offensichtlich schädigt die geringe Stromsteilheit und Stromdichte der Vorbelastungen die MO-Varistoren nur sehr gering, so dass die repetierende Belastbarkeit sehr nahe am Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen liegt.

### 5.4.2 Mehrfachbelastbarkeit mit Rechteckimpulsen

Eine noch höhere Relevanz als repetierende Wechselstromenergieeinträge haben für Hersteller und Anwender von Überspannungsableitern die Energieeinträge mit repetierenden Rechteckimpulsen. Rechteckimpulse bilden Leitungsentladungen nach, die in Hochspannungsnetzen zu hohen energetischen Belastungen der Überspannungsableiter führen können (siehe z. B. [IEC60099-5]). Aus diesem Grund stellen sie eine Standardbelastung für MO-Varistoren, die in Überspannungsableitern der Hochspannungsebene eingesetzt werden, dar und werden folglich auch in [IEC60099-4] (bzw. [IEC-37/416/FDIS]) und [IEEEC62.11-2012] zur Prüfung der Belastbarkeit eingesetzt. Auch die Stückprüfungen von MO-Varistoren am Ende des Fertigungsprozesses werden häufig mit Rechteckimpulsen durchgeführt.

Bei den typischerweise verwendeten Rechteckimpulsen sind Stromsteilheit und Stromscheitelwert höher, hingegen die Dauer des Energieeintrags geringer als bei den in Kapitel 5.4.1 verwendeten Wechselstromenergieeinträgen. Ferner handelt es sich bei der Rechteckimpulsbelastung um eine monopolare Belastung, was die Ladungsträgerverteilung im MO-Varistor möglicherweise beeinflusst (siehe Kapitel 2.2). Um die Belastbarkeit von MO-Varistoren mit repetierenden Rechteckimpulsen zu bestimmen, werden die nachfolgenden Untersuchungen durchgeführt.

In einer Voruntersuchung wurde von fünf Produktionslosen jeweils ein MO-Varistor repetierenden Rechteckimpulsvorbelastungen mit einem Energieniveau, das 50 % der in Kapitel 5.1 (unter Verwendung des „komplexen Fehlerkriteriums“) ermittelten mittleren Ausfallenergie entspricht, ausgesetzt. Dies führte, je nach Produktionslos, zu Energieeinträgen der Vorbelastungen von etwa  $450 \text{ J/cm}^3$  bis  $550 \text{ J/cm}^3$ . Bei dieser repetierenden Vorbelastung fielen vier der fünf untersuchten MO-Varistoren vor Erreichen der 20. Vorbelastung mechanisch aus. Offensichtlich ist das durch repetierende Rechteckimpulsbelastungen einbringbare Energieniveau geringer als bei repetierenden Wechselstromenergieeinträgen.

In einer weiteren Voruntersuchung konnte jedoch bei vier von fünf Produktionslosen jeweils ein MO-Varistor gefunden werden, der 100 repetierende Rechteckimpulsvorbelastungen bei

einem Energieniveau von  $300 \text{ J/cm}^3$  standhielt<sup>129</sup>. Dies lässt vermuten, dass die Grenze der repetierenden Belastbarkeit in diesem Energiebereich liegt. Um das Energieniveau von MO-Varistoren verschiedener Produktionslose zu ermitteln, bei dem kein untersuchter MO-Varistor während 20 Vorbelastungen<sup>130</sup> mechanisch ausfällt, wurde in Zusammenarbeit mit der Cigré-Arbeitsgruppe A 3.25 ein Prüfprogramm erarbeitet und vom Autor dieser Arbeit durchgeführt, das nachfolgend beschrieben wird.

Innerhalb dieses Prüfprogramms werden jeweils 20 MO-Varistoren aus drei Produktionslosen (im Folgenden mit „ $\alpha$ “, „ $\beta$ “ und „ $\gamma$ “ bezeichnet) mit 20 Rechteckimpulsen eines Energieniveaus vorbelastet. Kommt es zu mindestens einem mechanischen Ausfall während der Vorbelastungen, wird die Prüfung an 20 weiteren fabrikneuen MO-Varistoren bei einem Energieniveau wiederholt, das um  $50 \text{ J/cm}^3$  unterhalb des zuletzt geprüften Energieniveaus liegt. Dieses Verfahren wird für die MO-Varistoren jedes Produktionsloses solange wiederholt, bis bei einem erreichten Energieniveau bei 20 MO-Varistoren 20 Rechteckimpulse zu keinem mechanischen Ausfall während der Vorbelastung führen.

Das Ablaufdiagramm jeder einzelnen Messreihe, bei der 20 MO-Varistoren mit 20 Rechteckimpulsen vorbelastet werden, ist in *Abbildung 5.25* dargestellt. Um MO-Varistoren mit besonders geringem Energieaufnahmevermögen auszusortieren, werden alle untersuchten MO-Varistoren vorab mit einem Wechselstromenergieeintrag mit einer Stromdichte von  $3,5 \text{ A/cm}^2$  bei einem Energieniveau, das etwa 80 % der mittleren Einzelimpulsausfallenergie entspricht, vorbelastet<sup>131</sup>.

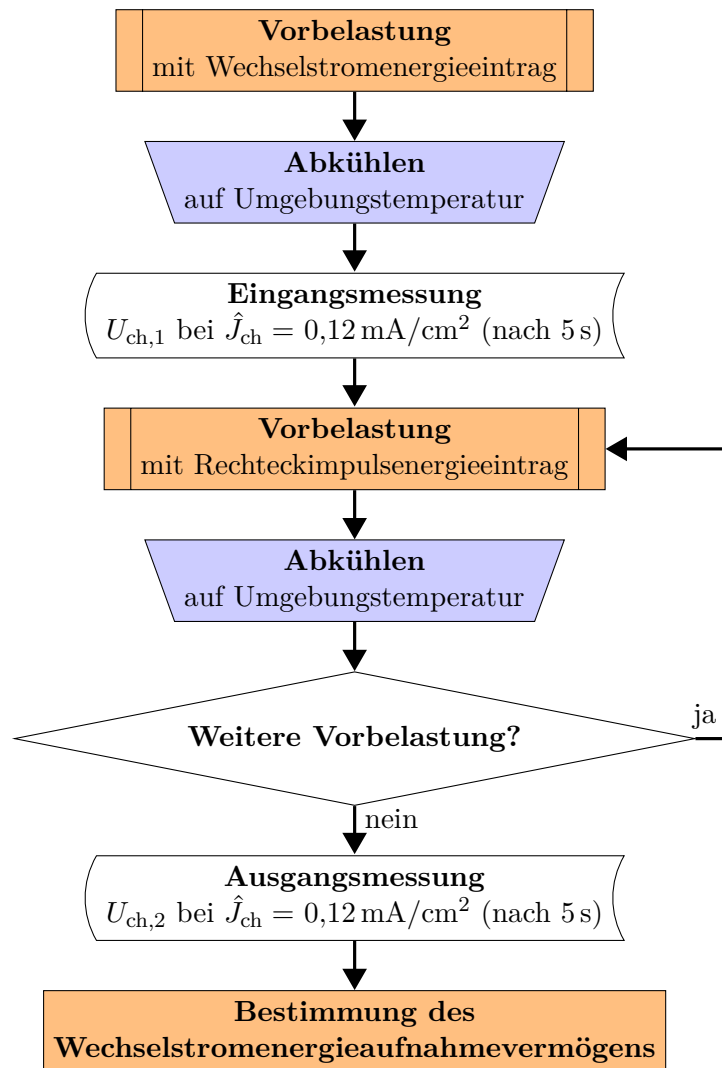
An 20 MO-Varistoren, die dieser Vorbelastung standhalten, wird anschließend eine Eingangsmessung durchgeführt, in der die „charakteristische Spannung“ bei einem Scheitelwert der Stromdichte von  $0,12 \text{ mA/cm}^2$  bestimmt wird. Im Anschluss daran werden die 20 Vorbelastungen mit einem Rechteckimpuls mit einer Scheiteldauer von 1,9 ms durchgeführt. Das Energieniveau wird über die Stromdichte des Energieeintrags reguliert, wobei die Stromdichten der Vorbelastungen von etwa  $25 \text{ A/cm}^2$  bis  $60 \text{ A/cm}^2$  eingestellt werden. Nach jeder Vorbelastung werden die MO-Varistoren auf Umgebungstemperatur abgekühlt.

Nach 20 Vorbelastungen wird eine Ausgangsmessung durchgeführt, in der die „charakteristische Spannung“ der Eingangsmessung erneut bei einem Scheitelwert der Stromdichte von  $0,12 \text{ mA/cm}^2$  gemessen wird. Die „charakteristische Spannung“ wird nicht nach jedem

<sup>129</sup> Die „charakteristische Spannung“ der vorbelasteten MO-Varistoren stieg während der Vorbelastungen um etwa 1 % bis 4 % an.

<sup>130</sup> Die Anzahl von 20 Vorbelastungen sind aufgrund der Energieprüfungen nach [IEEEC62.11-2012], [IEC60099-4] sowie [IEC-37/416/FDIS] besonders interessant.

<sup>131</sup> Aus den Untersuchungen in Kapitel 5.4.1 lässt sich folgern, dass diese Belastung zu keiner Vorschädigung im MO-Varistor führt.



**Abbildung 5.25:** Ablaufdiagramm der repetierenden Belastungen mit Rechteckimpulsen (nach [Tuc13a])



**Tabelle 5.5:** Energieniveau und MO-Varistorausfälle während 20 Vorbelastungen mit repetierenden Rechteckimpulsen von 20 MO-Varistoren (nach [Tuc13a])

Produktionslos	„ $\alpha$ “		„ $\beta$ “		„ $\gamma$ “	
Energieniveau in J/cm <sup>3</sup>	150	200	250	300	300	350
Anzahl der Ausfälle (von 20 MO-Varistoren)	0	1	0	2	0	8
Impulsnummer, bei der die MO-Varistoren ausfielen	-	5	-	3, 6	-	1, 1, 3, 4, 4, 4, 19, 20

Energieeintrag bestimmt, weil sich der Erkenntnisgewinn bei den Voruntersuchungen als gering herausgestellt hat.

Am Ende jeder Versuchsreihe wird das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen der MO-Varistoren, die die Vorbelastungen ohne mechanische Schäden überstanden haben, bei einer Belastung mit einem Wechselstromenergieeintrag mit einer Stromdichte von 3,5 A/cm<sup>2</sup> bestimmt. Es wird der gleiche Energieeintrag wie der in Kapitel 5.4.1 beschriebene und nicht beispielsweise ein zerstörender Rechteckimpuls gewählt, um die Ergebnisse mit denen der repetierenden Wechselstrombelastungen direkt vergleichen zu können.

Das höchste Energieniveau der Vorbelastung, bei der während der Untersuchungen keine MO-Varistoren durch die Vorbelastungen ausfallen, sowie das nächst höhere Energieniveau (bei dem die ersten MO-Varistoren ausfallen) ist in *Tabelle 5.5* dargestellt. Da bei den MO-Varistoren des Produktionsloses „ $\alpha$ “ bei dem Energieniveau von 200 J/cm<sup>3</sup> nur ein MO-Varistor ausgefallen ist, sollte das niedrige Energieniveau dieses Produktionsloses nicht überbewertet werden. Die übrigen Energieniveaus liegen mit 250 J/cm<sup>3</sup> bis 300 J/cm<sup>3</sup> bei etwa 1/3 bis 1/2 der Energie, die während der Vorbelastungen mit repetierenden Wechselstromenergieeinträgen eingebracht werden kann (siehe Kapitel 5.4.1). Damit sind diese sehr nahe an bzw. teilweise unter dem typischen Nennenergieaufnahmevermögen<sup>132</sup> von Standard-Überspannungsableitern. Insgesamt lässt sich jedoch festhalten, dass die mit Rechteckimpulsen repetierend einbringbare Energie deutlich unterhalb der mittleren Einzelimpulsbelastbarkeit liegt. Diese liegt nach Kapitel 5.1 bei etwa 800 J/cm<sup>3</sup> bis 1200 J/cm<sup>3</sup> bei Verwendung der gleichen Impulsdauer, jedoch höheren Stromdichten.

In *Tabelle 5.6* ist von dem Energieniveau der MO-Varistoren jedes untersuchten Produktionsloses, bei dem keiner der 20 MO-Varistoren während der 20 Vorbelastungen ausgefallen ist, die Änderung der „charakteristischen Spannung“ und die des Einzelimpulsenergieaufnahmevermögens angegeben. Die „charakteristische Spannung“ steigt infolge der

<sup>132</sup> Das Nennenergieaufnahmevermögen liegt nach [Hin12] üblicherweise im Bereich von 200 J/cm<sup>3</sup> bis 300 J/cm<sup>3</sup>.

**Tabelle 5.6:** Änderung der „charakteristischen Spannung“ und des mittleren Einzelimpulsenergieaufnahmevermögens infolge von 20 Vorbelastungen mit repetierenden Rechteckimpulsen des genannten Energieniveaus (nach [Tuc13a])

Produktionslos	„ $\alpha$ “	„ $\beta$ “	„ $\gamma$ “
Energieniveau der Vorbelastung ohne MO-Varistorausfall in $\text{J}/\text{cm}^2$	150	250	300
Anstieg der „charakteristischen Spannung“ durch die Vorbelastungen in %	0,5	1,3	2,2
Mittleres Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen in p. u.	1,09	1,07	1,05
Variationskoeffizient	0,078	0,032	0,044

Vorbelastungen nur unwesentlich im Bereich von 0,5 % bis 2,2 % an. Da sich jedoch die untersuchten MO-Varistoren von den in Kapitel 5.4.1 untersuchten unterscheiden, kann hier kein direkter Vergleich gezogen werden. Da auch bei den repetierenden Belastungen mit Rechteckimpulsen die „charakteristische Spannung“ ansteigt, wird auch durch diese Belastung die thermische Stabilität von Standard-Überspannungsableitern nicht gefährdet. Aus diesem Grund erscheint es nicht sinnvoll, dass nach [IEEEC62.11-2012] vor der thermischen Stabilitätsprüfung die MO-Varistoren mehrfachen Rechteckimpulsbelastungen ausgesetzt werden.

Die MO-Varistoren, die 20 Vorbelastungen stand gehalten haben, werden am Ende der Untersuchung mit einem mechanisch zerstörenden Wechselstromenergieeintrag mit einer Stromdichte von  $3,5 \text{ A}/\text{cm}^2$  belastet. Die Ausfallbilder dieser MO-Varistoren gleichen denen von fabrikneuen MO-Varistoren, die durch einen Wechselstromenergieeintrag gleicher Stromdichte bis zur mechanischen Zerstörung belastet werden. Die mittlere Ausfallenergie der durch 20 Rechteckimpulse vorbelasteten MO-Varistoren ist bezogen auf die von fabrikneuen MO-Varistoren in Tabelle 5.6 dargestellt. Wie bei den repetierenden Wechselstromenergieeinträgen steigt diese auch bei den repetierenden Rechteckimpulsen leicht an. In diesem Fall werden jedoch die MO-Varistoren der Versuchsreihen untersucht, bei denen es keine Ausfälle während der Vorbelastungen mit Rechteckimpulsen gab. Jedoch wurden die MO-Varistoren mit einem geringen Energieaufnahmevermögen durch eine Vorbelastung mit einem Wechselstromenergieeintrag aussortiert. Aus diesem Grund ist auch in diesem Fall ein Anstieg der mittleren Ausfallenergie auf das Fehlen von „Ausreißen“ mit niedrigerem Energieaufnahmevermögen zurückzuführen. Dieser Anstieg ist jedoch bei Berücksichtigung des Variationskoeffizienten sehr gering. Bei den MO-Varistoren des Produktionsloses „ $\gamma$ “ ist während der Vorbelastungen mit einem Energieniveau von  $350 \text{ J}/\text{cm}^3$  jeweils ein MO-Varistor bei der 19. und 20. Vorbelastung ausgefallen. Dies könnte ein Hinweis darauf

sein, dass bei dieser Vorbelastung eine Vorschädigung der MO-Varistoren stattfindet, was durch die Bestimmung des Einzelimpulsenergieaufnahmevermögens jedoch nicht gestützt wird (wie oben beschrieben). Auch die Auswertung der Ausfallbilder liefert keine Hinweise auf eine Vorschädigung. So bleibt festzuhalten, dass bei den in Tabelle 5.6 genannten Energieniveaus (der jeweiligen Produktionslose) bei repetierenden Rechteckimpulsen keine Ermüdungserscheinungen festzustellen sind. Höhere Belastungen scheinen das Material zu ermüden, dies ist mit dieser Untersuchung jedoch nicht klassifizierbar<sup>133</sup>.

Als Ergebnis der Untersuchung kann festgehalten werden, dass die repetierend einbringbare Energie bei Rechteckimpulsbelastungen im Gegensatz zu Wechselstromenergieeinträgen deutlich geringer ist als das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen. Eine Ursache hierfür könnte der deutlich höhere Stromscheitelwert, die höhere Stromsteilheit oder der wesentlich kürze Zeitraum des Energieeintrags sein, der möglicherweise zu höheren mechanischen Spannungen und damit möglicherweise zu fortschreitender Rissbildung im MO-Varistor führt.

##### 5.4.3 Vergleich der Mehrfachbelastbarkeit unterschiedlicher Impulsformen gleicher Energiedichte

Die bereits vorgestellten Untersuchungen zu der repetierenden Belastbarkeit mit Wechselstromenergieeinträgen und Rechteckimpulsen zeigen, dass die repetierende Belastbarkeit in keinem festen Verhältnis zu der Einzelimpulsbelastbarkeit steht, sondern von der Impulsart oder der Stromdichte/Stromsteilheit des Energieeintrags abhängig ist. Im nächsten Schritt soll nun der Einfluss des Energieeintrags der repetierenden Belastungen für verschiedene Impulsformen<sup>134</sup> vergleichend untersucht werden. Hierbei wird das Ziel verfolgt, das Ermüdungsverhalten und die Parameter, die zur Ermüdung führen, weiter einzugrenzen.

Als Belastungsformen werden wie in den vorangegangenen Untersuchungen Energieeinträge mit Wechselstrom, Rechteckimpulse mit einer Scheiteldauer von 1,9 ms und zusätzlich Doppel exponentialstoßströme der Form 90/200  $\mu$ s untersucht. Aufgrund der Untersuchungsergebnisse mit repetierenden Rechteckimpulsbelastungen, werden die Energiebelastungen auf 200 J/cm<sup>3</sup>, 300 J/cm<sup>3</sup> und 400 J/cm<sup>3</sup> festgelegt. Dabei werden bei allen Impulsformen die Dauer des Energieeintrags für die verschiedenen Energieniveaus konstant gehalten

<sup>133</sup> Die Auswertung der Wechselstromenergieeinträge der MO-Varistoren die mit Energieniveaus vorbelastet wurden, die zu ersten Ausfällen führten (das höhere der in Tabelle 5.5 dargestellten Energieniveaus), zeigt ebenfalls keine Verringerung des mittleren Energieaufnahmevermögens und keine Auffälligkeiten der Ausfallbilder.

<sup>134</sup> Da die Stromdichte mit dem Energieeintrag über die Stromform des verwendeten Impulses verknüpft ist, kann der Einfluss der Impulsform nicht von der der Stromdichte/Stromsteilheit des Energieeintrags getrennt werden.

und ausschließlich die Stromdichte (und hierdurch auch die Spannungsbelastung) variiert. Die Anzahl von 20 vergleichbar belasteten Prüflingen wird aufgrund der statistischen Aussagekraft beibehalten, jedoch die Anzahl der untersuchten Produktionslose auf zwei begrenzt (mit „1“ und „2“ gekennzeichnet). Die vorangegangenen Untersuchungen zeigen zwar Unterschiede für die MO-Varistoren verschiedener Produktionslose, dennoch scheint der Mehraufwand nicht durch den Informationsgewinn gerechtfertigt.

Das Ablaufdiagramm der Untersuchung, die an 20 MO-Varistoren pro Energieniveau, Belastungsart und Produktionslos durchgeführt wurde, ist in *Abbildung 5.26* dargestellt. An jedem MO-Varistor wird zunächst eine Eingangsmessung durchgeführt, in der die Restspannung<sup>135</sup> bei einem Blitzstoßstrom mit einem Stromsichelwert von 10 kA und die „charakteristische Spannung“ bei einem Sichelwert der Stromdichte von 0,07 mA/cm<sup>2</sup> bestimmt wird. Die Reduzierung der Stromdichte hat praktische Gründe und verringert ferner den Einfluss der in dieser Untersuchung nach jeder Vorbelastung durchgeführten Bestimmung der „charakteristischen Spannung“ auf die Ladungsverteilung im MO-Varistor.

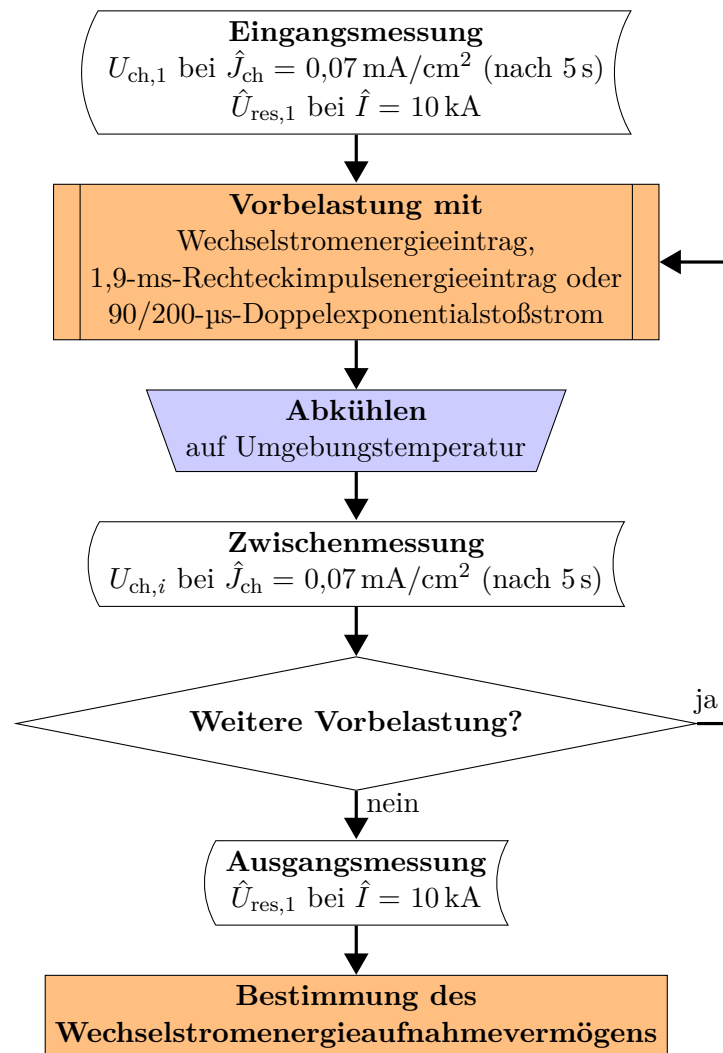
Die anschließend durchgeführte Vorbelastung mit einem Wechselstromenergieeintrag (mit einer Dauer von acht Halbwellen unabhängig vom gewählten Energieniveau), einem Rechteckimpuls mit einer Sicheldauer von 1,9 ms oder einem Doppelexponentialstoßstrom der Form 90/200 µs, werden bei einem Energieniveau von 200 J/cm<sup>3</sup>, 300 J/cm<sup>3</sup> bzw. 400 J/cm<sup>3</sup> durchgeführt<sup>136</sup>. Dies führt bei einem Energieniveau von 300 J/cm<sup>3</sup> bei den Wechselstromenergieeinträgen zu einer Stromdichte von etwa 5 A/cm<sup>2</sup>, bei den Rechteckimpulsen zu etwa 50 A/cm<sup>2</sup> und bei den Doppelexponentialstoßströmen der Form 90/200 µs zu etwa 550 A/cm<sup>2</sup>. Die abgeleitete Ladung betrug bei dem vorher genannten Energieniveau bei den Wechselstromenergieeinträgen etwa 3,8 C, bei den Rechteckimpulsen etwa 3,5 C und bei den Doppelexponentialstoßströmen der Form 90/200 µs etwa 2,8 C. Die Höhe des Energieeintrages einer Vorbelastung (das Energieniveau) wird bei allen Energieeintragsformen durch Variation der Belastungsstromdichte (und damit auch der Spannungsbelastung des Prüflings) und nicht durch die Belastungsdauer festgelegt.

Nach jeder Vorbelastung wird der Prüfling durch Fremdkühlung innerhalb von etwa 15 min auf Umgebungstemperatur abgekühlt und im Anschluss daran eine Zwischenmessung durchgeführt, in der die „charakteristische Spannung“ bestimmt wird. Diese wird nach

---

<sup>135</sup> In der Ein- und Ausgangsmessung wird eine Restspannungsmessung durchgeführt, da Restspannungsänderungen für die Schutzcharakteristik von Überspannungsableitern eine große Bedeutung haben. Um die Belastung durch die Restspannungsmessung zu begrenzen, wird diese jedoch nicht bei den Zwischenmessungen wiederholt.

<sup>136</sup> Die Vorbelastungen mit Rechteckimpulsen bei einer Energiedichte von 200 J/cm<sup>3</sup> und bei dem Produktionslos „2“ die Wechselstromenergieeinträge mit 200 J/cm<sup>3</sup> und 300 J/cm<sup>3</sup> werden nicht durchgeführt.



**Abbildung 5.26:** Ablaufdiagramm der repetierenden Belastungen mit Wechselstromenergieeinträgen, Rechteckimpuls- und Doppelexponentialstoßstrombelastungen gleicher Energiedichte

## 5 Impulsbelastbarkeit von MO-Varistoren

jedem Energieeintrag bestimmt, um den Fehlermechanismus eines Ausfalls während der Vorbelastungen weiter eingrenzen zu können. Die Kontaktelektroden werden nach jeder Vorbelastung ausgetauscht. Es konnte nachgewiesen werden, dass dieser Austausch (eventuelle Beschädigungen durch ein Verschweißen der Elektroden) nur einen geringen Einfluss auf die Metallisierung der MO-Varistoren hat und die Untersuchungsergebnisse nicht beeinflusst.

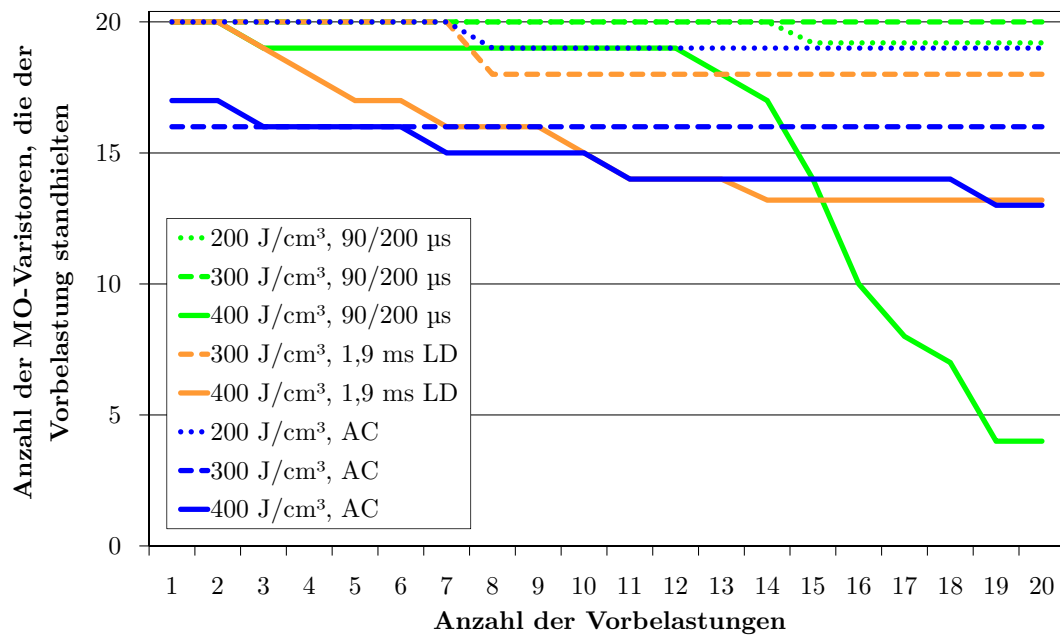
Nach 20 Vorbelastungen wird eine Ausgangsmessung an den MO-Varistoren durchgeführt, die den Vorbelastungen mechanisch standgehalten haben. In dieser werden die Restspannung bei einem Blitzstoßstrom mit einem Stromscheidenwert von 10 kA und im Anschluss daran das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen bei einem Wechselstromenergieeintrag mit einer Stromdichte von  $3,5 \text{ A/cm}^2$  bis zur mechanischen Zerstörung bestimmt.

Jede Versuchsreihe bei einem Energieniveau und einer Belastungsform eines Produktionsloses wird mit 20 MO-Varistoren begonnen, und die Anzahl sowie die Impulsnummer eines etwaigen Ausfalles werden dokumentiert. *Abbildung 5.27* liefert für die MO-Varistoren des Produktionsloses „1“ (a) und die des Produktionsloses „2“ (b) einen Überblick darüber, wieviele MO-Varistoren der unterschiedlichen Messreihen welcher Anzahl an Vorbelastungen standhielten. Für die MO-Varistoren des Produktionsloses „2“ werden die Vorbelastungen mit Wechselstromenergieeinträgen des Energieniveaus  $200 \text{ J/cm}^3$  und  $300 \text{ J/cm}^3$  nicht durchgeführt, da bei dem Energieniveau von  $400 \text{ J/cm}^3$  kein Ausfall auftrat und deshalb für die geringeren Energieniveaus ebenfalls keine Ausfälle zu erwarten sind.

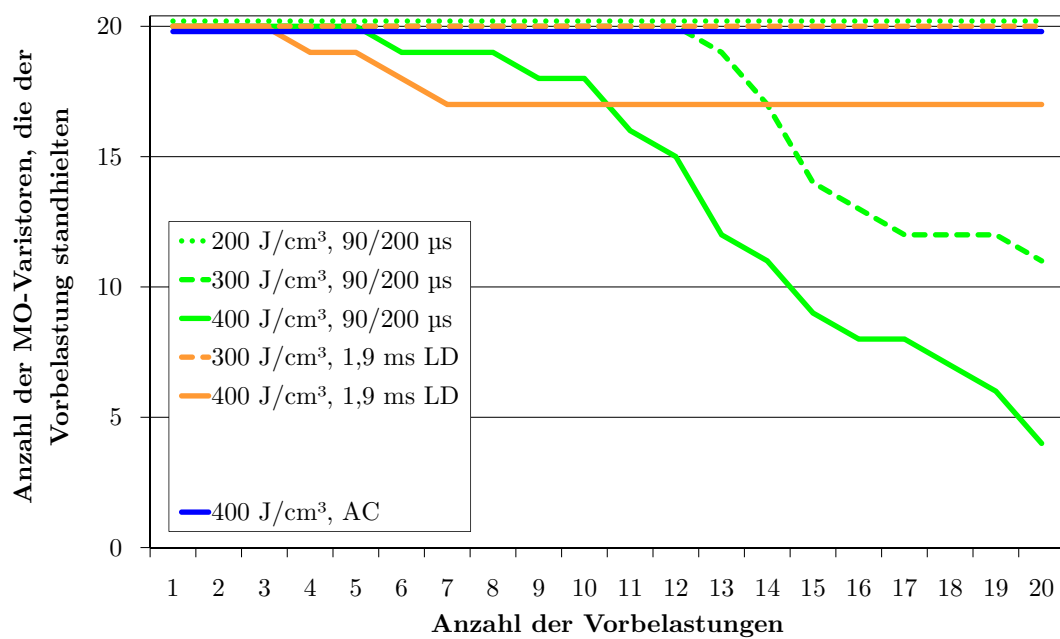
Für die MO-Varistoren des Produktionsloses „1“ ist zu beobachten, dass bei den Vorbelastungen mit Wechselstromenergieeinträgen mit einem Energieniveau von  $300 \text{ J/cm}^3$  und  $400 \text{ J/cm}^3$  drei bzw. vier MO-Varistoren bereits bei der ersten Vorbelastung ausfallen, wohingegen bei  $200 \text{ J/cm}^3$  insgesamt nur ein MO-Varistor bei der achten Vorbelastung ausfällt. Weiterhin fallen bei Vorbelastung mit Wechselstromenergieeinträgen eines Energieniveaus von  $400 \text{ J/cm}^3$  noch weitere MO-Varistoren aus, sodass bei diesem Energieniveau nur dreizehn MO-Varistoren den 20 Vorbelastungen standhalten.

Für die Vorbelastungen mit Rechteckimpulsen mit einer Scheiteldauer von 1,9 ms ist zu beobachten, dass bei einem Energieniveau von  $300 \text{ J/cm}^3$  nur zwei MO-Varistoren (beide bei der achten Vorbelastung) ausfallen, wohingegen bei einem Energieniveau von  $400 \text{ J/cm}^3$  kontinuierlich Ausfälle zu beobachten sind, die gegen Ende der Versuchsreihe weniger werden.

Für die Vorbelastungen mit dem Doppel exponentialstoßstrom der Form  $90/200 \mu\text{s}$  tritt für das Energieniveau mit  $200 \text{ J/cm}^3$  ein Ausfall bei der 15. Vorbelastung auf und für  $300 \text{ J/cm}^3$  kein Ausfall. Hingegen fallen bei einem Energieniveau von  $400 \text{ J/cm}^3$  nach



(a)



(b)

**Abbildung 5.27:** Anzahl der MO-Varistoren (von 20), die den Vorbelastungen mit dem Doppel exponentialstoßstrom der Form 90/200  $\mu$ s, den Rechteckimpulsen („LD“) mit einer Scheiteldauer von 1,9 ms bzw. den Wechselstromenergieeinträgen („AC“) standhalten. (a) Produktionslos „1“, (b) Produktionslos „2“

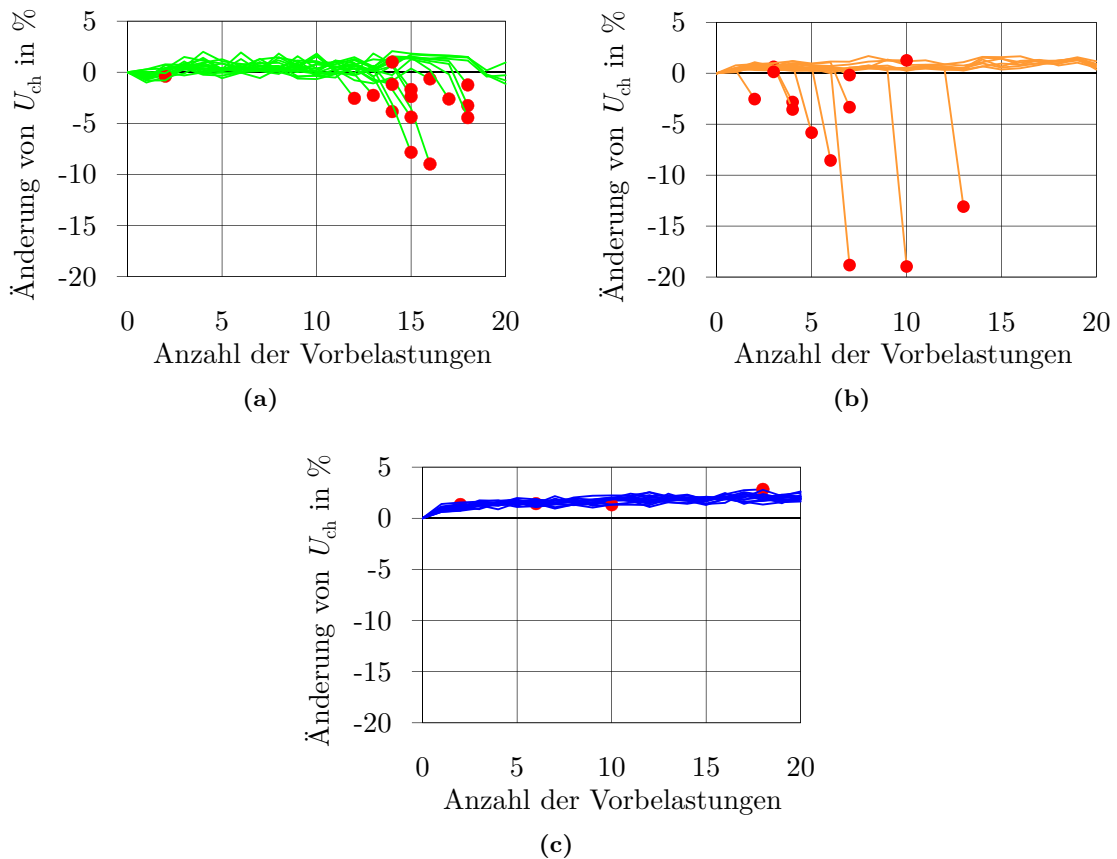
der 12. Vorbelastung sehr viele MO-Varistoren aus, sodass nur vier MO-Varistoren 20 Vorbelastungen standhalten.

Die Ergebnisse der MO-Varistoren des Produktionsloses „2“ bestätigen die Ergebnisse der Untersuchungen am Produktionslos „1“, weisen aber einige Besonderheiten auf. Bei den MO-Varistoren des Produktionsloses „2“ treten bei den Wechselstromenergieeinträgen mit  $400 \text{ J/cm}^3$  keine Ausfälle und insbesondere auch keine während der ersten Vorbelastung auf. Während der Vorbelastungen mit Rechteckimpulsen fallen weniger MO-Varistoren aus als bei dem Produktionslos „1“. Die Vorbelastungen mit einem Energieniveau von  $400 \text{ J/cm}^3$  führen zwischen der vierten und der siebten Vorbelastung zu drei Ausfällen. Die Vorbelastungen mit dem Doppelexponentialstoßstrom der Form  $90/200 \mu\text{s}$  stellt auch für die MO-Varistoren des Produktionsloses „2“ die Belastungsform mit den meisten Ausfällen dar. Hier ist jedoch bereits bei einem Energieniveau von  $300 \text{ J/cm}^3$  ein deutlicher Anstieg der Ausfälle ab der 13. Vorbelastung zu beobachten. Diese Tendenz wird durch das Steigern des Energieniveaus auf  $400 \text{ J/cm}^3$  noch verstärkt.

Die Änderung der „charakteristischen Spannung“ während der Vorbelastungen ist für die MO-Varistoren des Produktionsloses „1“ für die verschiedenen Belastungsarten mit einem Energieniveau von  $400 \text{ J/cm}^3$  in *Abbildung 5.28* dargestellt. Dabei stellt jede Linie einen vorbelasteten MO-Varistor dar. Der letzte Wert der „charakteristischen Spannung“ vor einem Ausfall ist rot markiert. Auffällig ist, dass bei den Belastungen mit dem Doppelexponentialstoßstrom und dem Rechteckimpuls häufig unmittelbar vor einem Ausfall ein deutlicher Rückgang der „charakteristischen Spannung“ zu beobachten ist, wohingegen dies bei keinem Wechselstromenergieeintrag beobachtet werden kann. Das Verhalten des deutlichen Rückgangs der „charakteristischen Spannung“ vor einem Ausfall ist ebenfalls bei den MO-Varistoren des Produktionsloses „2“ zu erkennen, die mit Doppelexponentialstoßströmen belastet wurden. Weiterhin zeigen die MO-Varistoren beider Produktionslose vor einem mechanischen Ausfall während der Vorbelastungen mit Doppelexponentialstoßströmen und Rechteckimpulsen „schwarze Flecken“ auf der Metallisierung. Sowohl die „schwarzen Flecken“ als auch die Reduktion der „charakteristischen Spannung“ deuten auf beginnende Schmelzkanäle im MO-Varistor hin, die möglicherweise im Laufe der Vorbelastungen zu einem Durchschlag durch den MO-Varistor anwachsen.

Die mittlere Änderung der „charakteristischen Spannungen“ und der Restspannung infolge von 20 Vorbelastungen der MO-Varistoren, die diesen standhielten, ist für die MO-Varistoren beider Produktionslose in *Tabelle 5.7* dargestellt. Bei der Bewertung der Kennwerte ist zu beachten, dass der Variationskoeffizient der angegebenen Mittelwerte im Bereich von 0,01 bis 0,02 liegt und somit die Abweichungen zwischen den verschiedenen Belastungen größtenteils kleiner als eine Standardabweichung sind.





**Abbildung 5.28:** Die Änderung der „charakteristischen Spannung“  $U_{ch}$  von MO-Varistoren des Produktionsloses „1“ infolge der Vorbelastungen mit einem Energieniveau von  $400 \text{ J/cm}^3$  für (a) Doppelsexponentialstoßstrom der Form  $90/200 \mu\text{s}$ , (b) Rechteckimpuls mit einer Scheiteldauer von  $1,9 \text{ ms}$  und (c) Wechselstromenergieeinträge

Die „charakteristische Spannung“ ändert sich (wie bei den vorangegangenen Untersuchungen) durch die Vorbelastungen nur in einem sehr geringen Maße. Weiterhin hat die Änderung mit einer Ausnahme ein positives Vorzeichen, was bei konstanter angelegter Spannung zu einer geringeren Verlustleistung führt. Ein Anstieg der „charakteristischen Spannung“ ist vermutlich auf eine Erholung (durch Diffusionsvorgänge, die durch den Temperaturanstieg unterstützt werden) der durch die Stückprüfung entstandenen Degradation zurückzuführen. Es kann festgehalten werden, dass die thermische Stabilität von Standard-Überspannungsableitern durch die untersuchten repetierenden Belastungen nicht gefährdet wird. Der einzige negative Wert wurde bei einer Vorbelastung mit Doppelsexponentialstoßströmen mit einem Energieniveau von  $400 \text{ J/cm}^3$  bei den MO-Varistoren des Produktionsloses „1“ gemessen und ist, wie Abbildung 5.28 (a) verdeutlicht (die Abbildung stellt dieselbe Messreihe dar), auf statistische Streuungen der Messwerte zurückzuführen.

**Tabelle 5.7:** Mittlere Änderung der „charakteristischen Spannung“ und der Restspannung während der repetierenden Vorbelastungen mit dem Doppel exponentialstoßstrom der Form 90/200  $\mu\text{s}$  („DESS“), dem Rechteckimpuls mit einer Scheiteldauer von 1,9 ms „LD“ oder einem Wechselstromenergieeintrag („AC“)

Belastungsart	Energie- niveau in $\text{J}/\text{cm}^3$	Produktionslos 1		Produktionslos 2	
		Änderung von $U_{\text{ch}}$ in %	Änderung von $\hat{U}_{\text{res}}$ in %	Änderung von $U_{\text{ch}}$ in %	Änderung von $\hat{U}_{\text{res}}$ in %
Vorbelastung mit 90/200 $\mu\text{s}$ „DESS“	200	1,3	0,5	1,5	1,5
	300	0,6	0,7	1,4	1,2
	400	-0,3	-0,1	0,3	0,7
Vorbelastung mit 1,9 ms „LD“	300	1,1	1,9	1,1	0,6
	400	0,8	0,8	1,5	0,4
Vorbelastung mit „AC“	200	2,3	-1,5	nicht durchgeführt	
	300	2,4	-0,1	nicht durchgeführt	
	400	2,1	0,6	3,5	2,8

Bei dem Vergleich der mittleren Änderungen der „charakteristischen Spannungen“ bei den verschiedenen Vorbelastungen fällt auf, dass die Vorbelastungen mit Doppel exponentialstoßströmen und Rechteckimpulsen im Vergleich zu den Vorbelastungen mit Wechselspannungen zu 1 % bis 2 % geringeren mittleren Änderungen führen. Ein Erklärungsansatz hierfür ist, dass während der Stückprüfung nach dem Herstellungsprozess die  $UI$ -Kennlinie im Vordurchbruchbereich verändert wird. Eine Veränderung im Vordurchbruchbereich durch Impulsstrombelastung zeigt sich (siehe z. B. [Kle04]) in einer Stromasymmetrie während der Messung der „charakteristischen Spannung“, wie sie auch während dieser Untersuchung auftritt. Diese Stromasymmetrie wird nach [Kle04] durch weitere Impulsstrombelastung gleicher Kennwerte, vor allem gleicher Polarität, nur noch unwesentlich verändert. Eine Auswertung der Stromverläufe der „charakteristischen Spannung“ nach Vorbelastungen mit Doppel exponentialstoßströmen der Form 90/200  $\mu\text{s}$  zeigt, dass sich die Stromasymmetrie durch diese Vorbelastungen nur unwesentlich verändert. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die Ladungsträgerverteilung durch diese Art der Belastung nicht weiter verändert wird und folglich keine weitere Änderung der „charakteristischen Spannung“ eintritt. Im Gegensatz dazu nimmt die Stromasymmetrie nach Wechselstromenergieeinträgen leicht ab, was darauf hindeutet, dass die Vorzugsrichtung durch die Ladungsträgerverteilung an der Korngrenze in Teilen durch die Vorbelastungen alternierender Polarität zurückgebildet wird. Dies könnte ein Grund dafür sein, dass die „charakteristische Spannung“ bei dieser Vorbelastungsform stärker ansteigt.

Die Auswertung der mittleren Änderungen der Restspannung zeigt, dass diese durch die Vorbelastungen nur unwesentlich beeinflusst wird, was aufgrund der Ergebnisse des Einzelimpulsenergieaufnahmevermögens in Kapitel 5.1 (in der nur sehr selten Restspannungsänderungen detektiert werden) zu erwarten gewesen ist.

Die Ausfallbilder der belasteten MO-Varistoren zeigen nach Vorbelastungen mit Wechselstromenergieeinträgen keine Auffälligkeiten. Bei höheren Stromdichten der Vorbelastung sind (bei höheren Energieniveaus der Vorbelastung deutlich häufiger als bei geringeren) auf den Stirnflächen der MO-Varistoren Rückstände von lokalen thermischen Überlastungen (beginnenden Schmelzkanälen) zu erkennen. Die Anzahl der Aufschmelzungen nimmt mit steigendem Energieniveau zu, wobei augenscheinlich keine Systematik bei der Verteilung auf der Stirnfläche zu erkennen ist. Treten die Aufschmelzungen im Laufe der Vorbelastungen auf, nimmt die Anzahl und die Größe mit zunehmender Anzahl der Vorbelastungen zu, bis unter Umständen bei einer der folgenden Vorbelastungen ein mechanischer Ausfall des MO-Varistors (Durchschlag, der zum Aufbrechen des MO-Varistors führt) eintritt. Sind vor der abschließenden zerstörenden Belastung mit einem Wechselstromenergieeintrag Aufschmelzungen auf den Stirnflächen zu erkennen, so führt die augenscheinlich größte zum Ausfall bei der zerstörenden Belastung<sup>137</sup>. Bei den MO-Varistoren, die augenscheinlich nach den Vorbelastungen keine Aufschmelzungen auf den Stirnflächen zeigen, ist auffällig, dass der Ausfallkanal bei dem zerstörenden Wechselstromenergieeintrag nach Vorbelastungen mit Wechselstromenergieeinträgen stets randnah erfolgt (kein Unterschied zum Ausfallbild von fabrikneuen MO-Varistoren), wohingegen dieser nach Vorbelastungen mit höheren Stromdichten unsystematisch auf der Stirnfläche streut. Insgesamt deutet die Auswertung der Ausfallbilder auf eine Vorschädigung der MO-Varistoren durch Energieeinträge mit höheren Stromdichten hin, wobei höhere Energieniveaus der Vorbelastungen zu stärkeren Vorschädigungen zu führen scheinen.

Am Ende der Untersuchung wird das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen bei Belastung mit einem Wechselstromenergieeintrag der MO-Varistoren der beiden Produktionslose, die den Vorbelastungen standgehalten haben, bestimmt<sup>138</sup>. Die Auswertungen des Einzelimpulsenergieaufnahmevermögens nach 20 Vorbelastungen ist für die MO-Varistoren beider Produktionslose in *Abbildung 5.29* dargestellt, wobei jede Markierung einem untersuchten MO-Varistor entspricht. Die Ausfallenergien sind auf diejenigen von fabrikneuen MO-Varistoren des jeweiligen Produktionsloses bei der gleichen Belastung normiert. Den Diagrammen ist zu entnehmen, dass die grün eingezeichneten Ausfallenergien für die Vorbelastungen

<sup>137</sup> Eine genauere statistische Auswertung ist nicht möglich, da die Anzahl der geprüften MO-Varistoren zu gering ist.

<sup>138</sup> Zwei MO-Varistoren pro Versuchsreihe des Produktionsloses 1 wurden nicht zerstört, sondern für weitere Materialanalysen aufbewahrt.

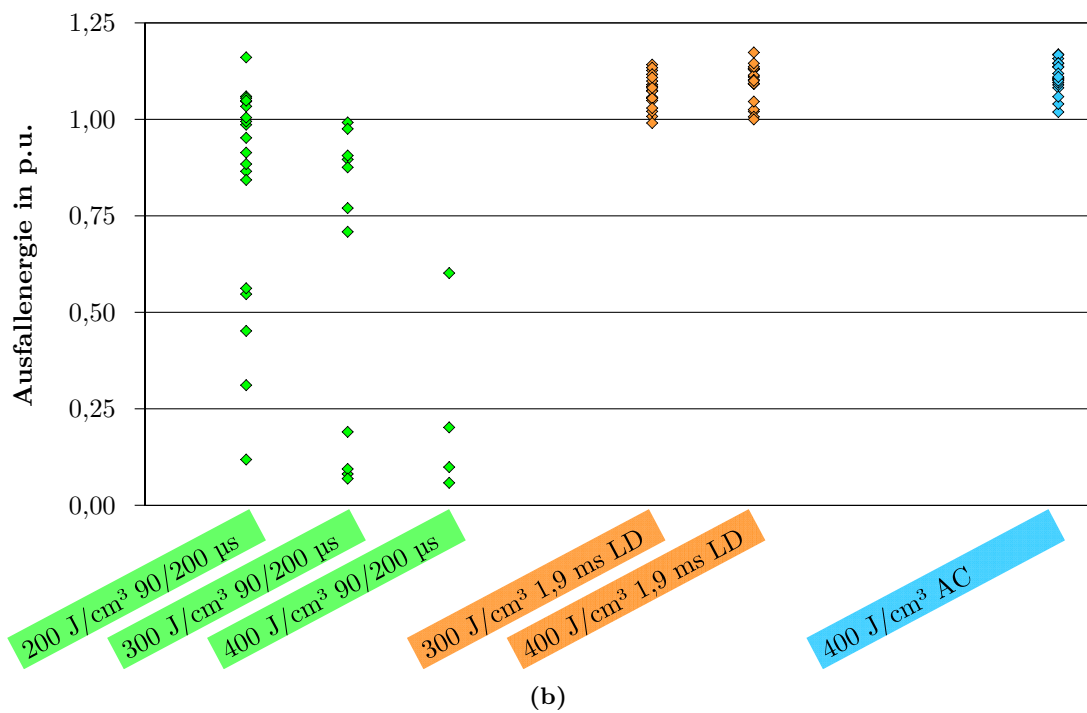
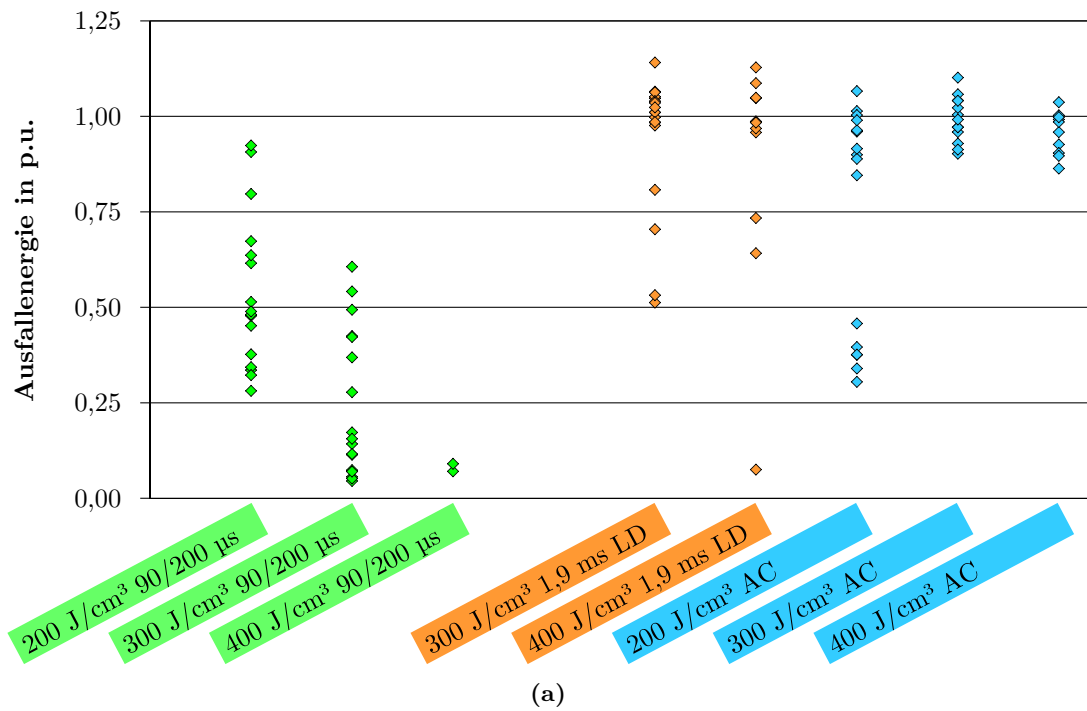
mit den Doppelsexponentialstoßströmen der Form  $90/200\text{ }\mu\text{s}$  sehr stark streuen und mit steigendem Energieniveau der Vorbelastung abnehmen. Die blau eingezeichneten Ausfallenergien nach Wechselstromvorbelastungen hingegen streuen bis auf die Ausreißer der MO-Varistoren des Produktionsloses „1“ bei einem Energieniveau von  $200\text{ J/cm}^3$  wesentlich weniger und bewegen sich im Bereich der Ausfallenergien fabrikneuer MO-Varistoren. Die Ausfallenergien nach Vorbelastungen mit Rechteckimpulsen zeigen ein uneinheitliches Verhalten. Die MO-Varistoren des Produktionsloses „2“ streuen nur sehr gering und liegen im Bereich von fabrikneuen MO-Varistoren, bei den Ausfallenergien der MO-Varistoren des Produktionsloses „1“ hingegen gibt es einige Ausreißer mit sehr geringem Energieaufnahmevermögen.

Während der Vorbelastungen der MO-Varistoren des Produktionsloses „1“ mit Wechselstromenergieeinträgen fallen bei den Energieniveaus  $300\text{ J/cm}^3$  und  $400\text{ J/cm}^3$  drei bis vier MO-Varistoren pro Energieniveau während der ersten Vorbelastungen aus. Bei dem Energieniveau von  $200\text{ J/cm}^3$  hingegen ist kein MO-Varistor während der ersten Vorbelastungen ausgefallen. In Abbildung 5.29 ist jedoch zu erkennen, dass fünf MO-Varistoren, die der Vorbelastung stand gehalten haben, ein niedrigeres Energieaufnahmevermögen als die übrigen MO-Varistoren aufweisen<sup>139</sup>. Es liegt die Vermutung nahe, dass das untersuchte Produktionslos „1“ etwa 20 % MO-Varistoren mit geringerem Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen enthält. Diese MO-Varistoren scheinen während der Vorbelastungen mit dem Energieniveau von  $300\text{ J/cm}^3$  und  $400\text{ J/cm}^3$  durch mechanische Zerstörung auszufallen, wohingegen sie den Vorbelastungen mit  $200\text{ J/cm}^3$  standhalten. Die untersuchten MO-Varistoren des Produktionsloses „2“ scheinen hingegen keine gleichwertigen Ausreißer mit geringerem Wechselstromenergieaufnahmevermögen zu enthalten.

Bei den Vorbelastungen der MO-Varistoren des Produktionsloses „1“ mit Rechteckimpulsen fallen nur bei dem Energieniveau von  $400\text{ J/cm}^3$  während der ersten Vorbelastungen MO-Varistoren aus, bei den Vorbelastungen mit dem Doppelsexponentialstoßströmen lediglich einer bei einem Energieniveau von  $400\text{ J/cm}^3$  und keiner bei den ersten Vorbelastungen der übrigen Energieniveaus. Da die Gruppe der MO-Varistoren des Produktionsloses „1“, die mit Rechteckimpulsen und Doppelsexponentialstoßströmen vorbelastet wurden, wahrscheinlich etwa den gleichen Anteil MO-Varistoren mit geringerem Wechselstromenergieaufnahmevermögen enthält, lässt sich folgern, dass diese MO-Varistoren nicht durch die Rechteckimpuls- und Doppelsexponentialstoßstromvorbelastungen mechanisch zerstört werden. Da zu vermuten ist, dass die MO-Varistoren mit einem geringeren Wechselstromenergieaufnahmevermögen Fehlstellen bzw. Inhomogenitäten<sup>140</sup> enthalten, führen sie offensichtlich

<sup>139</sup> Es ist keine Korrelation zwischen den Ausfallbildern der zerstörenden Wechselstrombelastungen und dem Energieaufnahmevermögen der MO-Varistoren zu erkennen.

<sup>140</sup> Eine Untersuchung der Ausfallkanäle von MO-Varistoren mit einem geringeren Wechselstromenergie-



**Abbildung 5.29:** Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen (Wechselstromenergieeintrag) bei Belastung der MO-Varistoren, die 20 Vorbelastungen der unterschiedlichen Belastungsarten und Energieniveaus standhielten. Jede Markierung beschreibt die Ausfallenergie eines MO-Varistors. (a) Produktionslos „1“ und (b) Produktionslos „2“

zu einer Reduktion des Wechselstromenergieaufnahmevermögens, wohingegen diese offensichtlich keine oder nur geringe Auswirkungen auf die Impulsbelastbarkeit schnellerer Energieeinträge mit höheren Stromdichten haben.

Es lässt sich zusammenfassen, dass offensichtlich Wechselstromenergieeinträge im Gegensatz zu Rechteckimpulsen und Doppelsexponentialstoßströmen die MO-Varistoren weniger stark ermüden und Wechselstromenergieeinträge MO-Varistoren mit Fehlstellen möglicherweise besser (durch einen mechanischen Ausfall) detektieren können. Aus diesem Grund wird die These entwickelt, dass sich Wechselstromenergieeinträge besser für eine Stückprüfung (nach dem Herstellungsprozess) eignen als kürzere Energieeinträge, wie z. B. die zur Zeit häufig verwendeten Rechteckimpulse. Möglicherweise findet durch die inhomogenere Stromverteilung bei Energieeinträgen mit kleinerer Stromdichte und längerer Beanspruchungsdauer (siehe [Bar96b] und [Bar01]) eine stärkere Konzentration des Stromflusses auf Strompfade mit Fehlstellen statt als bei schnelleren Energieeinträgen mit höherer Stromdichte. Ein direkter Vergleich von zwei Stückprüfverfahren ist in Kapitel 5.4.4 vorgestellt.

### **Vergleich der Ausfallenergien von Wechselstromenergieeinträgen mit Rechteckimpulsen nach repetierenden Belastungen**

In den bislang beschriebenen Untersuchungen wird das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen von MO-Varistoren, die repetierenden Belastungen standgehalten hatten, stets mit Wechselstromenergieeinträgen bestimmt. Da für unterschiedliche Fehlermechanismen unterschiedliche Belastungen (Belastungsdauern bzw. Stromdichten) kritisch sein können, wird in diesem Abschnitt das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen bei einem Wechselstromenergieeintrag mit dem bei einem Rechteckimpuls von repetierend belasteten MO-Varistoren verglichen.

Zu diesem Zweck werden die Untersuchungen zur repetierenden Belastbarkeit aus Kapitel 5.4.3 an MO-Varistoren des Produktionsloses „1“ wiederholt. Als Belastungsarten werden Wechselstromenergieeinträge bzw. Energieeinträge mit Doppelsexponentialstoßströmen der Form  $90/200 \mu\text{s}$  bei einem Energieniveau von  $300 \text{ J/cm}^3$  verwendet. Diese werden gewählt, da sie die beiden Extremwerte der Vorbelastungen in Bezug auf Stromdichte und Belastungsdauer darstellen. Als Energieniveau wird  $300 \text{ J/cm}^3$  verwendet, da bei einem höheren Energieniveau bei dem Doppelsexponentialstoßstrom nur sehr wenige Prüflinge

---

aufnahmevermögen mit Hilfe eines Rasterelektronenmikroskops liefert keine eindeutigen Erkenntnisse zur Ausfallursache. Lediglich bei einem MO-Varistor kann im Ausfallkanal an einer Stelle eine höhere Bismutkonzentration als in der übrigen Keramik detektiert werden. Es ist möglich, dass durch den Lichtbogen in Folge des Ausfalls die Fehlstelle zu stark verändert wird und deshalb im Nachhinein der Ausfallgrund nicht mehr bestimmt werden kann.

den Vorbelastungen standhalten und bei einem kleineren Energieniveau mögliche Vorschädigungseffekte vermutlich weniger stark ausgeprägt sind. Der Ablauf der Untersuchung gleicht dem in Abbildung 5.26 dargestellten. Der einzige Unterschied besteht darin, dass das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögens nicht mit einem Wechselstromenergieeintrag, sondern mit einem Rechteckimpuls mit einem prospektiven Scheitelwert<sup>141</sup> von 1,9 ms und einer Stromdichte von etwa 180 A/cm<sup>2</sup> bestimmt wird. Da die vorhandene Prüflingsanzahl begrenzt ist, jedoch die Untersuchungen zur Vergleichbarkeit an dem gleichen Produktionslos durchgeführt werden müssen, wird die Anzahl der untersuchten MO-Varistoren pro Belastungsart auf zehn reduziert.

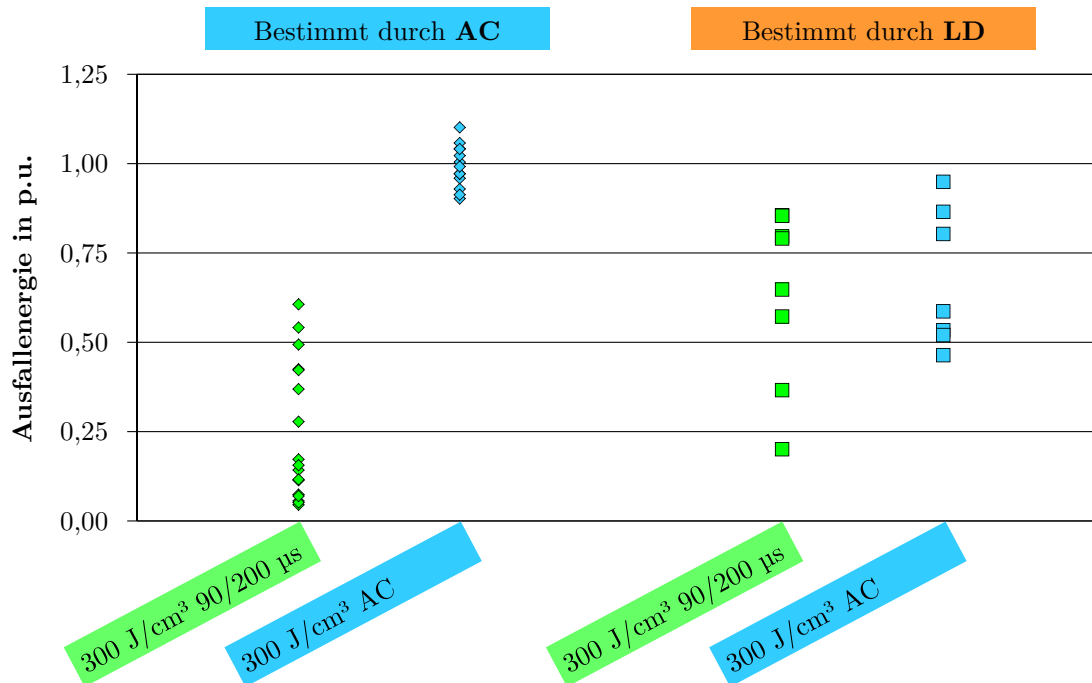
Die Ausfälle während der Vorbelastungen weisen keine signifikanten Unterschiede zu den in Abbildung 5.27 dargestellten auf. Die Änderung der „charakteristischen Spannung“ und der Restspannung zeigt ebenfalls keine signifikanten Unterschiede zu den in Kapitel 5.4.3 vorgestellten. Die Ausfallbilder infolge der abschließenden Bestimmung des Einzelimpulsenergieaufnahmevermögens nach 20 Vorbelastungen weisen ebenfalls keine signifikanten Unterschiede zu denen nach Belastung von fabrikneuen MO-Varistoren auf. Wie bei den zerstörenden Wechselstromenergieeinträgen ist auch bei der Belastung mit einem zerstörenden Rechteckimpuls keine Korrelation zwischen dem Ausfallbild und dem Energieaufnahmevermögen der MO-Varistoren augenscheinlich zu erkennen.

Die Ergebnisse der abschließenden Bestimmung des Einzelimpulsenergieaufnahmevermögens mit einem mechanisch zerstörenden Rechteckimpuls sind im Vergleich mit den Untersuchungsergebnissen aus dem vorigen Kapitel mit einem mechanisch zerstörenden Wechselstromenergieeintrag in Abbildung 5.30 dargestellt. Die Ausfallenergie jedes einzelnen MO-Varistors ist auf die mittlere Ausfallenergie bei der gleichen Belastung normiert.

Für die Vorbelastungen mit den Doppel exponentialstoßströmen der Form 90/200 µs bei einem Energieniveau von 300 J/cm<sup>3</sup> ist für die Ausfallenergien bei beiden Zerstörungsarten das gleiche Verhalten zu beobachten. Die Ausfallenergien bei Belastung bis zur mechanischen Zerstörung mit einem Rechteckimpuls streuen ebenfalls in einem sehr großen Bereich. Bei diesen liegen die absoluten Werte der Ausfallenergien jedoch über typischen Nennenergien von Überspannungsableitern in Standardanwendungen, da der Bezugswert, das mittlere Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen fabrikneuer MO-Varistoren, für diese Zerstörungsart etwa 25 % höher liegt als bei Wechselstromenergieeinträgen.

Die Ausfallenergien, die mit Rechteckimpulsen nach Vorbelastungen mit Wechselstromenergieeinträgen bestimmt werden, streuen stärker als nach den bisherigen Untersuchungen

<sup>141</sup> Die MO-Varistoren werden bis zur mechanischen Zerstörung belastet, daher richtet sich die tatsächliche Belastungsdauer nach dem Energieaufnahmevermögen des jeweiligen Prüflings und ist somit kürzer als 1,9 ms.



**Abbildung 5.30:** Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen der MO-Varistoren des Produktionsloses „1“ bei Belastung mit einem Wechselstromenergieeintrag („AC“) bzw. einem Rechteckimpuls („LD“) bis zur mechanischen Zerstörung nach repetierenden Belastungen

(insbesondere der zu Abbildung 5.5 dargestellten) zu erwarten wäre. Nach den Ergebnissen der hier vorgestellten Untersuchung müssten durch die Vorbelastungen mit Wechselstromenergieeinträgen im MO-Varistor Vorschädigungen entstanden sein, die sich auf die Ausfallenergie bei Belastung mit Rechteckimpulsen auswirken, nicht jedoch auf die Ausfallenergie bei Belastung mit Wechselstromenergieeinträgen. Für dieses Verhalten fehlt jedoch bislang eine Modellvorstellung. Dennoch lässt sich als Ergebnis festhalten, dass die Ausfallenergien bei dieser Belastungsart deutlich über der typischen Nennenergie von Überspannungsableitern in Standardanwendungen liegen und somit die Bestimmung der Ausfallenergie mit Hilfe eines Wechselstromenergieeintrags den kritischeren Fall abprüft.

### Mehrfachbelastbarkeit bei alternierender Polarität der Energieeinträge

In den bereits vorgestellten Untersuchungen sind prinzipielle Unterschiede im Ermüdungsverhalten zwischen Wechselstromenergieeinträgen und Impulsenergieeinträgen mit Rechteckimpulsen bzw. Doppel exponentialstoßströmen aufgetreten. Außer in der Stromdichte und Impulsform unterscheiden sich diese Belastungsarten auch in der Polarität der Belastungen. Während die Impulsbelastungen die MO-Varistoren monopolar belasten (bei



#### 5.4 Belastbarkeit von MO-Varistoren mit repetierenden Energieeinträgen

den repetierenden Energieeinträgen werden die MO-Varistoren immer mit der gleichen Polarität belastet) stellt die Wechselstrombelastung eine bipolare Belastung da. Um den Einfluss der Polarität einzugrenzen, wird die nachfolgende Untersuchung durchgeführt, bei der die repetierenden Impulsbelastungen mit alternierender Polarität durchgeführt und mit den bereits vorgestellten monopolen Belastungen verglichen werden.

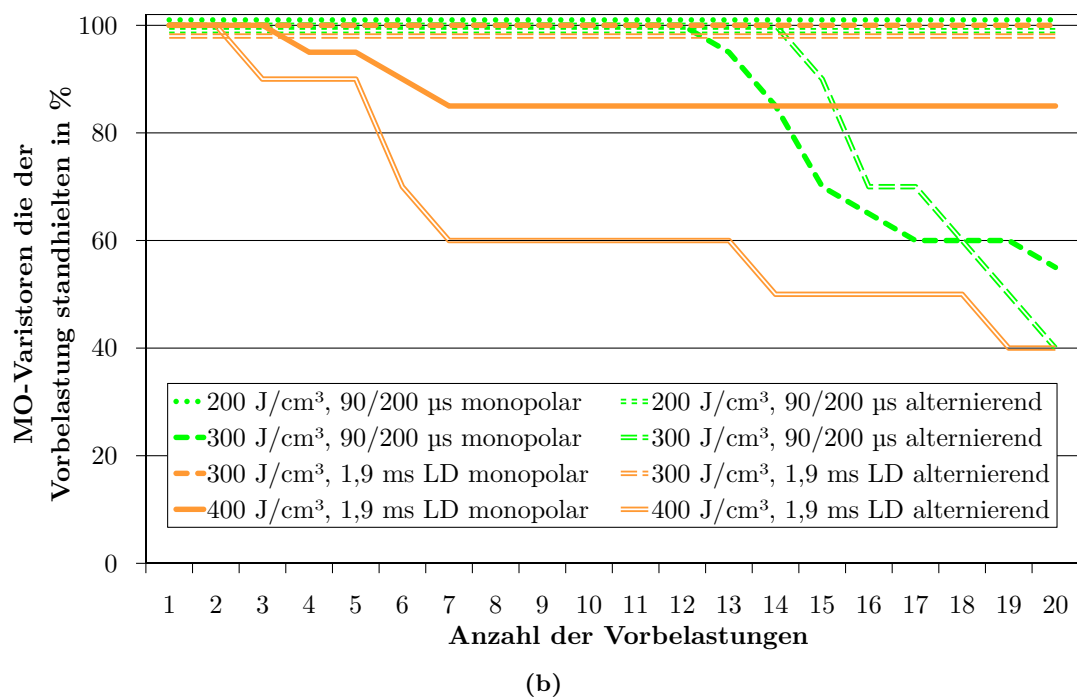
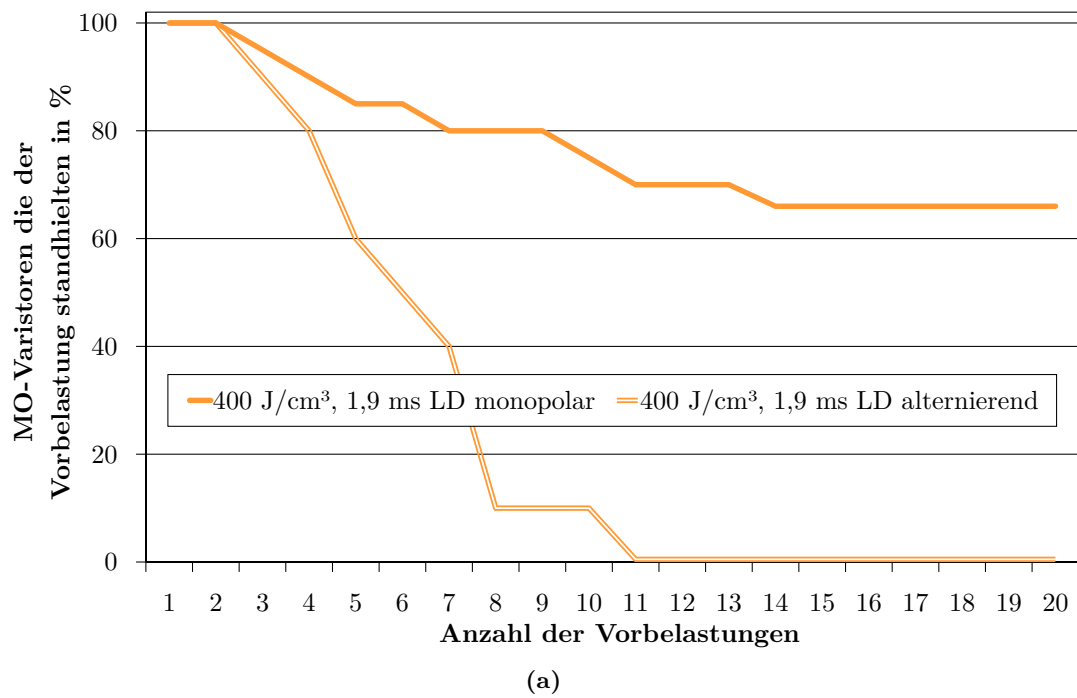
Der Ablauf gleicht dem in Abbildung 5.26 dargestellten, mit der Ausnahme, dass aufeinanderfolgende Vorbelastungen durch umgekehrten Einbau der Prüflinge in der Einspannvorrichtung entgegengesetzte Polaritäten haben. Dies wird im Folgenden mit „alternierend“ bezeichnet. Die Handhabung der MO-Varistoren ist bei beiden Untersuchungen gleich. Auch die monopolar belasteten Prüflinge werden nach jedem Energieeintrag zum Abkühlen der Einspannvorrichtung entnommen.

In Abbildung 5.31 ist der Anteil der MO-Varistoren, die der Anzahl an Vorbelastungen standhielten, für Vorbelastungen mit monopolarer bzw. alternierender Polarität dargestellt. Da die monopolen Belastungen mit 20 MO-Varistoren pro Versuchsreihe durchgeführt wurde, wohingegen (aus Mangel an Prüflingen) bei der alternierenden Belastung nur zehn Prüflinge pro Versuchsreihe verwendet werden, ist zur Vergleichbarkeit der prozentuale Anteil MO-Varistoren, die der Vorbelastung standhielten, dargestellt.

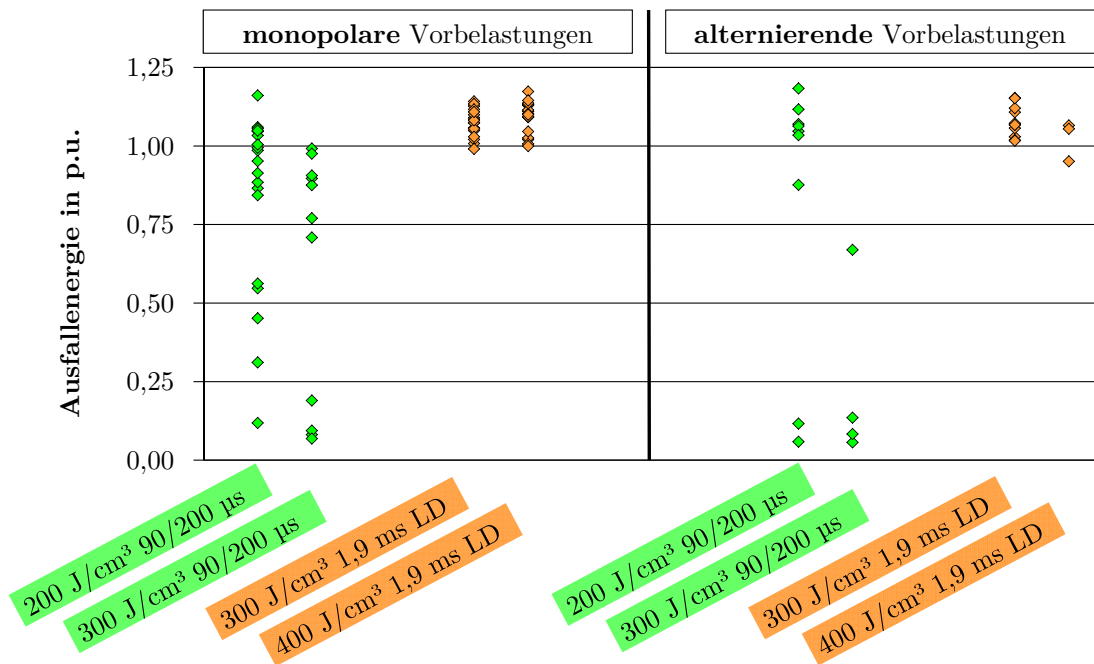
Es ist zu erkennen, dass die MO-Varistoren des Produktionsloses „1“ bei alternierender Vorbelastung mit repetierenden Rechteckimpulsen bei einem Energieniveau von  $400 \text{ J/cm}^3$  früher ausfallen als bei der monopolen Vorbelastung. Keiner der zehn alternierend, repetierend vorbelasteten MO-Varistoren hält mehr als zehn Belastungen stand, wohingegen von den 20 monopolar vorbelasteten dreizehn MO-Varistoren 20 Belastungen standhalten.

Die Untersuchungen an den MO-Varistoren des Produktionsloses „2“ bestätigen dieses Ergebnis. Auch diese MO-Varistoren halten deutlich weniger alternierenden als monopolen Rechteckimpulsen bei einem Energieniveau von  $400 \text{ J/cm}^3$  stand. Bei Vorbelastungen mit Doppel exponentialstoßströmen bei einem Energieniveau von  $300 \text{ J/cm}^3$  konnte jedoch kein deutlicher Unterschied mehr bestimmt werden.

Die Ausfallenergien, bestimmt durch einen mechanisch zerstörenden Wechselstromenergieeintrag, der MO-Varistoren des Produktionsloses „2“, die den Vorbelastungen mit monopolarer bzw. alternierender Polarität standhielten, ist bezogen auf die Ausfallenergie fabrikneuer MO-Varistoren in Abbildung 5.32 dargestellt. Es sei noch einmal daraufhingewiesen, dass für die alternierenden Belastungen nur zehn MO-Varistoren pro Energieniveau und Energieeintragsart belastet worden sind, weshalb die Ausfallenergie nur von entsprechend weniger MO-Varistoren bestimmt werden kann. Die Ausfallenergien der MO-Varistoren zeigen ebenfalls ein ähnliches Verhalten, wenn man die geringe Stichprobe berücksichtigt.



**Abbildung 5.31:** Prozentualer Anteil der MO-Varistoren, die den monopolaren bzw. alternierenden Vorbelastungen mit dem Doppelsexponentialstoßstrom der Form 90/200 µs bzw. den Rechteckimpulsen („LD“) mit einer Scheiteldauer von 1,9 ms standhalten. (a) Produktionslos „1“, (b) Produktionslos „2“



**Abbildung 5.32:** Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen der MO-Varistoren des Produktionsloses „2“ bei Belastung mit einem Wechselstromenergieeintrag bis zur mechanischen Zerstörung, nach repetierenden Belastungen monopolarer bzw. alternierender Polarität mit Doppel exponentialstoßströmen der Form 90/200 µs bzw. Rechteckimpulsen („LD“) mit einer Scheiteldauer von 1,9 ms. Die Ausfallenergie ist bezogen auf die von fabrikneuen MO-Varistoren dargestellt.

Die Ausfallbilder der mit alternierender Polarität belasteten MO-Varistoren zeigen ein vergleichbares Bild wie die mit monopolarer Polarität belasteten. Somit lässt sich als Ergebnis insgesamt festhalten, dass keine eindeutige Tendenz, welche Polaritätsvariante zu einer größeren Ermüdung führt, erkennbar ist.

Die bisherigen Ergebnisse deuten darauf hin, dass das in den in Kapitel 5.4.3 beobachtete geringere Ermüdungsverhalten für Wechselstromenergieeinträge nicht durch den Polaritätswechsel dieser Energieeintragsart begründet ist<sup>142</sup>. Vielmehr scheinen bei den untersuchten Rechteckimpulsbelastungen repetierende Vorbelastungen mit alternierender Polarität zu einer stärkeren Ermüdung der MO-Varistoren zu führen. Ob bei Doppel exponentialstoßstrombelastungen mit den untersuchten Parametern repetierende Belastungen mit alternierender Polarität zu einer stärkeren Ermüdung führen, kann auf Grund der bisherigen Untersuchungen nicht sicher beantwortet werden.

<sup>142</sup> Ein Einfluss der beobachteten Effekte von der Stromdichte der Vorbelastungen kann jedoch nicht ausgeschlossen werden.

Fasst man die Ergebnisse aus dem gesamten Kapitel 5.4.3 zusammen, so lässt sich festhalten, dass offensichtlich MO-Varistoren stärker durch Energieeinträge mit höherer Stromdichte und kürzerer Energieeintragsdauer vorgeschädigt werden als durch Energieeinträge geringerer Stromdichte und längerer Energieeintragsdauer. Dabei wirkt sich die Vorschädigung auf die Ausfallhäufigkeit während repetierender Vorbelastungen und das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen nach den Vorbelastungen aus. Besonders deutlich sind die Unterschiede im Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen bei zerstörenden Wechselstrombelastungen. Ein Unterschied zwischen repetierenden Vorbelastungen mit alternierender bzw. monopolarer Polarität kann nur für die untersuchten Rechteckimpulse beobachtet werden, die Untersuchungen der Doppelsexponentialstoßströme führen zu keinem eindeutigen Ergebnis. Bei den Rechteckimpulsbelastungen scheinen die Vorbelastungen mit alternierender Polarität zu einer stärkeren Ermüdung und folglich größerer Vorschädigung der MO-Varistoren zu führen. Weiterhin zeigt sich, dass mit repetierenden Wechselstromenergieeinträgen MO-Varistoren mit einem geringeren Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen durch mechanischen Ausfall detektiert werden können. Aus diesem Grund scheint diese Belastungsart (auch unter Berücksichtigung des geringeren Vorschädigungsverhaltens) für Stückprüfverfahren nach Herstellungsprozessen besonders gut geeignet zu sein.

Die deutlichen Unterschiede im Ermüdungsverhalten bei unterschiedlichen Belastungsarten (Stromdichte bzw. Energieeintragsdauer) bei gleichem Energieniveau zeigen deutlich, dass zum Nachweis des Impulsenergieaufnahmevermögens die Wahl der Belastungsart wie in [IEC-37/416/FDIS] eingegrenzt werden muss. Weiterhin erscheint es sinnvoll, dass sich die Belastungsart zum Nachweis des Impulsenergieaufnahmevermögens nach den im Betrieb auftretenden Belastungen richtet (z. B. bei Leitungsableitern).

### 5.4.4 Vergleich zweier Stückprüfverfahren

Die bisher vorgestellten Untersuchungen wurden alle an MO-Varistoren durchgeführt, die zuvor bereits beim Hersteller einer Stückprüfung unterzogen worden waren. Der Einfluss der Belastungen der Stückprüfungen auf die MO-Varistoren ist unbekannt und die Anzahl der Ausfälle während der Stückprüfung (Ausreißer) im Regelfall ein Firmengeheimnis. Ziel der nachfolgend dargestellten Untersuchung ist es, ein bisher angewandtes Stückprüfverfahren mit Rechteckimpulsen direkt mit einem Stückprüfverfahren mit einem Wechselstromenergieeintrag an MO-Varistoren, die noch keiner Stückprüfung unterzogen wurden, zu vergleichen. Daraus sollen Erkenntnisse abgeleitet werden, welches Stückprüfverfahren selektiver MO-Varistoren mit Fehlstellen aussortiert und trotzdem die MO-Varistoren weniger vorschädigt.

#### 5.4 Belastbarkeit von MO-Varistoren mit repetierenden Energieeinträgen

Zu diesem Zweck konnte ein Hersteller dafür gewonnen werden, ein Fertigungslos zur Verfügung zu stellen, das aus 2133 MO-Varistoren eines wesentlich größeren Durchmessers<sup>143</sup> als der bislang beschriebenen „Größe 1“ besteht. Etwa die Hälfte der MO-Varistoren werden standardmäßig direkt im Werk mit Rechteckimpulsen im Stromdichtebereich von  $15 \text{ A/cm}^2$  stückgeprüft. Die andere Hälfte wird an der TU Darmstadt mit einem Wechselstromenergieeintrag mit einer Stromdichte von etwa  $1,5 \text{ A/cm}^2$  des gleichen Energieniveaus (oberhalb von typischen Nennenergien von Standard-Überspannungsableitern) stückgeprüft.

In der Untersuchung fallen von den 1129 MO-Varistoren, die mit Rechteckimpulsen stückgeprüft werden, fünf MO-Varistoren mechanisch während der Stückprüfung aus. Von den 1004 MO-Varistoren, die mit einem Wechselstromenergieeintrag stückgeprüft werden, fallen ebenfalls fünf Stück mechanisch aus. Auch die Bestimmung des Einzelimpulsenergieaufnahmevermögens an einer Gruppe von 100 stückgeprüften MO-Varistoren pro Verfahren durch einen Wechselstromenergieeintrag mit einer Stromdichte von  $1,5 \text{ A/cm}^2$  zeigt keine Unterschiede im Energieaufnahmevermögen.

Die während der zwei verschiedenen Stückprüfungen ausgefallenen MO-Varistoren zeigen unterschiedliche Ausfallbilder. Während die durch Rechteckimpulse ausgefallenen MO-Varistoren durch einen randnahen Durchschlag ausfallen, streut der Durchschlagskanal bei den zerstörenden Wechselstromenergieeinträgen über der Stirnfläche der verschiedenen ausgefallenen MO-Varistoren. Der Vergleich der Ausfallbilder der zerstörenden Wechselstromenergieeinträge nach den zwei Stückprüfverfahren zeigt keinen Unterschied zwischen den unterschiedlich vorbelasteten MO-Varistoren.

Das untersuchte Produktionslos zeigt nur eine sehr geringe Anzahl an MO-Varistoren, die in dem jeweiligen Stückprüfverfahren mit einem geringeren Energieaufnahmevermögen ausfallen. Weiterhin ist unbekannt, ob durch die unterschiedlichen Stückprüfverfahren äquivalente MO-Varistoren als Ausreißer detektiert werden oder ob bei einer erneuten Prüfung der stückgeprüften MO-Varistoren mit dem jeweils anderen Verfahren ebenfalls etwa 0,5 % als Ausreißer detektiert würden. Außerdem bleibt unbekannt, ob in den beiden stückgeprüften MO-Varistorgruppen noch Ausreißer, wie der in Abbildung 5.4 gezeigte, enthalten sind.

Abschließend lässt sich festhalten, dass diese zwar beschränkte, aber erstmals in so großem Umfang durchgeführte Untersuchung keine Unterschiede im Sinne der Selektivität und der

---

<sup>143</sup> Es wurden MO-Varistoren mit einem größeren Durchmesser verwendet, da diese nach den Ergebnissen aus Kapitel 5.1 (siehe Abbildung 5.10) mit höherer Wahrscheinlichkeit Inhomogenitäten enthalten. Außerdem wird dieser MO-Varistortyp zum Schutz von Serienkompensationsanlagen eingesetzt und wird folglich im Betrieb mit Wechselstromenergieeinträgen belastet.

Vorschädigung der beiden Stückprüfverfahren mit Rechteckimpulsen bzw. einem Wechselstromenergieeintrag aufzeigt. Somit kann noch keine abschließende Empfehlung gegeben werden, welches Stückprüfverfahren unter welchen Voraussetzungen angewandt werden sollte. Die Stückprüfung mit Wechselstromenergieeinträgen im betrachteten Stromdichtebereich erscheint jedoch auf Grund der Untersuchungsergebnisse aus Kapitel 5.4.3 weiterhin eine Alternative zu sein. Daneben ist eine Stückprüfung mit Wechselstromenergieeinträgen auch effizienter in Bezug auf den Zeitaufwand der Prüfung und den Energieeinsatz, weshalb diese für die Hersteller von MO-Varistoren interessant ist und weiter untersucht werden sollte<sup>144</sup>.

### 5.5 Energieaufnahmevermögen von vorbeanspruchten MO-Varistoren

Mit Hilfe der in Kapitel 5.4.3 vorgestellten Untersuchungen kann die Mehrfachbelastbarkeit mit repetierenden Vorbelastungen gleichen Typs eingegrenzt werden. Die Wechselwirkung zwischen verschiedenen aufeinanderfolgenden energetischen Belastungen ist bislang nur am Rande betrachtet worden. Ziel der folgenden Untersuchungen ist es, die Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Belastungen einzugrenzen.

Bei der Betrachtung von Wechselwirkungen zwischen aufeinanderfolgenden Energieeinträgen ist bereits der Einfluss der Temperatur in Kapitel 5.2 und der von mechanischen Vorschädigungen in Kapitel 5.4 diskutiert worden. Der Einfluss von Ladungsträgerverschiebungen durch einen Energieeintrag, die z. B. zu Veränderungen der *UI*-Kennlinie führen, wurde bislang nicht betrachtet. Wie bereits aus früheren Untersuchungen bekannt ist (siehe z. B. [Dar94], [Den98], [Kle04] und [Rei08]), verändern Doppel exponentialstoßstrombelastungen mit hoher Stromdichte und Stromsteilheit die *UI*-Kennlinie im Vordurchbruchbereich. Ob diese Veränderungen das Energieaufnahmevermögen ebenfalls beeinflussen, ob und wie sich diese Veränderungen im Betrieb an Wechselspannung bei erhöhter Temperatur zurückbilden, wird in Untersuchungen des anschließenden Abschnitts bestimmt. Den Abschluss bildet ein Abschnitt, in dem das Energieaufnahmevermögen von MO-Varistoren aus Überspannungsableitern, die über längere Zeiträume im elektrischen Energieversorgungsnetz betrieben wurden (und somit realen Belastungen ausgesetzt waren), mit dem von fabrikneuen MO-Varistoren verglichen wird.

---

<sup>144</sup> Es ist zu beachten, dass ein einphasig nichtlinear belasteter Transformator der erforderlichen Größenordnung (bis 10 kV Prüfspannung und ca. 450 kVA Scheinleistung) häufig nicht in vorhandenen Netzen betrieben werden darf.

### 5.5.1 Auswirkung der Kennlinienalterung auf das Impulsenergieaufnahmevermögen

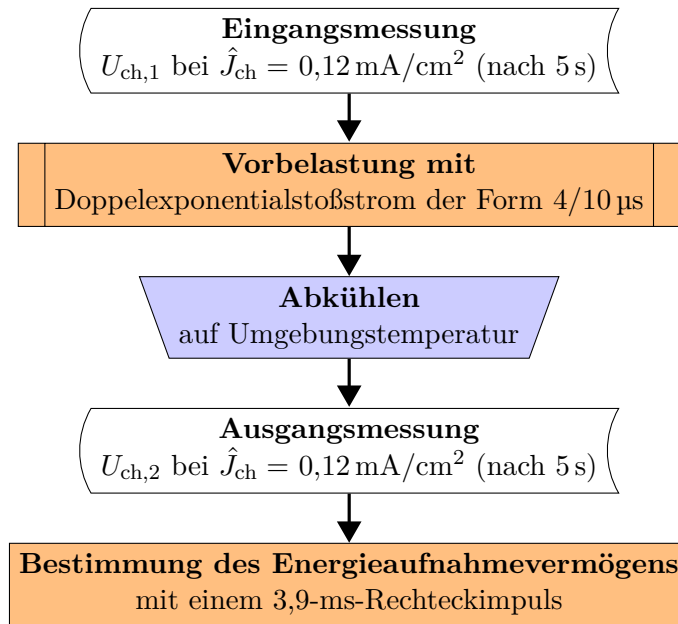
Während der Untersuchungen in [Rei08] ist die Hauptausfallursache der MO-Varistoren der „Größe 2“, die mit Doppelsexponentialstoßströmen der Form  $4/10\text{ }\mu\text{s}$  belastet wurden, die Änderung der „charakteristischen Spannung“ um mehr als 5 %. Diese Grenze wurde festgelegt, da nach [Rei08] davon ausgegangen wurde, dass bei höherer Änderung von einer „dauerhaften Veränderung im ZnO-Material ausgegangen werden“ kann. Ob Änderungen der „charakteristischen Spannung“ reversibel sind, bzw. ob diese ein Maß für die mechanische Vorschädigung sind, soll mit den nachfolgenden Untersuchungen bestimmt werden.

Für diese Untersuchungen werden MO-Varistoren der „Größe 2“ von drei Produktionslosen, die deutliche Änderungen der „charakteristischen Spannung“ während der Untersuchungen von [Rei08] (siehe Abbildung 5.9) zeigten, verwendet. Das Ablaufdiagramm der Untersuchung ist in *Abbildung 5.33* dargestellt. Alle MO-Varistoren werden zunächst einer Eingangsprüfung unterzogen, in der die „charakteristische Spannung“ bei einem Scheitelwert der Stromdichte von  $0,12\text{ mA/cm}^2$  (wie bei [Rei08]) bestimmt wird. Im Anschluss daran werden die MO-Varistoren mit einem Doppelsexponentialstoßstrom der Form  $4/10\text{ }\mu\text{s}$  vorbelastet. Für die MO-Varistoren jedes Produktionsloses werden individuell drei Stromdichten definiert, wobei die höchste Stromdichte so gewählt wird, dass kein MO-Varistor während der Vorbelastungen ausfällt.

Nach der Vorbelastung werden die MO-Varistoren durch Fremdkühlung innerhalb von etwa 15 min auf Umgebungstemperatur abgekühlt und im Anschluss daran die Ausgangsmessung durchgeführt, in der die „charakteristische Spannung“ erneut bestimmt wird.

Zum Abschluss der Untersuchung wird das Energieaufnahmevermögen mit Hilfe eines Rechteckimpulses mit einer Scheiteldauer von etwa 3,9 ms bestimmt, wobei die MO-Varistoren bis zur mechanischen Zerstörung belastet werden. Mit dem verwendeten Rechteckimpuls wird eine monopolare Belastung mit vergleichsweise geringer Stromdichte von etwa  $60\text{ A/cm}^2$  verwendet, um etwaige polaritätsabhängige Effekte detektieren zu können. Das Energieaufnahmevermögen wird pro Produktionslos und Vorbelastungsstromdichteniveau an zehn MO-Varistoren mit einem Rechteckimpuls vom gleicher Polarität wie die Vorbelastung, sowie an zehn weiteren mit inverser Polarität bestimmt.

Wie in Kapitel 5.1 in Abbildung 5.9 dargestellt, weisen die MO-Varistoren unterschiedlicher Produktionslose deutlich unterschiedliche Änderungen der „charakteristischen Spannung“ bei gleicher Stromstärke der Vorbelastung auf. Da ferner die Ausfallgrenze während der Vorbelastung (bezogen auf die Stromstärke der Vorbelastung) zwischen den MO-Varistoren

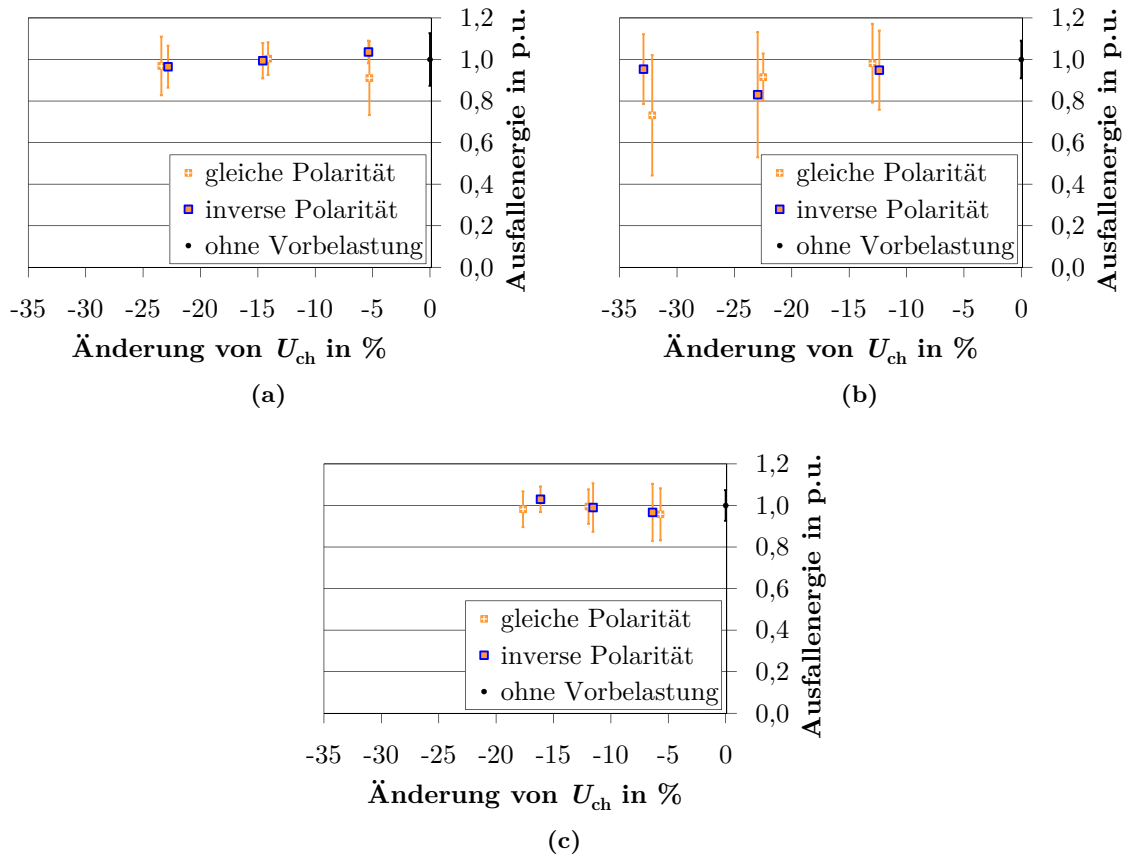


**Abbildung 5.33:** Ablaufdiagramm zur Bestimmung der Ausfallenergie nach Doppel exponentialstoßstromvorbelastrungen der Form 4/10 µs

der verschiedenen Produktionslose variiert, weisen die für diese Untersuchung erzeugten Änderungen der „charakteristischen Spannung“ deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Produktionslosen auf. Die Ergebnisse der Bestimmung des Energieaufnahmevermögens in Abhängigkeit der Änderung der „charakteristischen Spannung“ durch die Vorbelastung sind in *Abbildung 5.34* dargestellt. Die mittleren Ausfallenergien werden auf die von fabrikneuen MO-Varistoren normiert, wobei die Standardabweichung der Ausfallenergien von fabrikneuen MO-Varistoren in den Diagrammen bei einer Änderung von  $U_{ch}$  von „0 %“ dargestellt ist. Ausfallenergien, bei denen der zerstörende Rechteckimpuls die gleiche Polarität wie die der vorhergehenden Vorbelastung hat, sind mit „gleiche Polarität“ gekennzeichnet, die mit umgekehrter Polarität entsprechend mit „inverser Polarität“.

Für die MO-Varistoren der Produktionslose, deren Untersuchungsergebnisse in den Diagrammen von *Abbildung 5.34* (a) und (c) dargestellt sind, zeigt sich keine nennenswerte Reduktion des Energieaufnahmevermögens, selbst bei Vorbelastungen, die zu Änderungen der „charakteristischen Spannung“ im Bereich von 20 % führen. Für die MO-Varistoren des Produktionsloses, dessen Untersuchungsergebnisse in *Abbildung 5.34* (b) dargestellt sind, zeigt sich ein indifferentes Verhalten. Zwei Messreihen, deren Änderung der „charakteristischen Spannung“ infolge der Vorbelastung etwa 32 % bzw. etwa 23 % betrug, haben eine mittlere Ausfallenergie, die etwa 27 % bzw. 17 % geringer als die von neuen MO-Varistoren dieses Produktionsloses ist. Es ist jedoch zu beachten, dass diese Reduktionen geringer





**Abbildung 5.34:** Ausfallenergie (bestimmt mit Rechteckimpulsen mit einer Scheiteldauer von 3,9 ms) bei Vorbelastungen mit Doppel exponentialstoßströmen der Form 4/10  $\mu$ s, die zu einer deutlichen Änderung der „charakteristischen Spannung“  $U_{ch}$  führen, für die MO-Varistoren von drei verschiedenen Produktionslosen (a), (b) und (c). Die dargestellten Ausfallenergien sind auf die Ausfallenergien der jeweiligen fabrikneuen MO-Varistoren („ohne Vorbelastung“) bezogen.

sind als die jeweiligen Variationskoeffizienten und letztere bei den genannten Messreihen vergleichsweise hohe Werte annehmen. Dies liegt daran, dass bei diesen Messreihen jeweils einer der untersuchten MO-Varistoren ein besonders geringes Energieaufnahmevermögen nach der Vorbelastung zeigte, was bei einer Gruppengröße von zehn Prüflingen Mittelwert und Standardabweichung stark beeinflusst. Auch die Auswertung der Ausfallbilder nach dem zerstörenden Energieeintrag zeigt keinen Unterschied zwischen den verschieden stark vorbelasteten MO-Varistoren.

In einer weiteren Untersuchung werden die MO-Varistoren eines Produktionsloses mit Doppel exponentialstoßströmen der Form 4/10  $\mu$ s vorbelastet, die zu deutlichen Änderungen der „charakteristischen Spannung“ führten und das Energieaufnahmevermögen

anschließend bei Belastung mit einem Wechselstromenergieeintrag bei einer Stromdichte von  $3,5 \text{ A/cm}^2$  bestimmt. Die Vorbelastung führt während des Energieeintrags zu einem asymmetrischen Strom, wobei die Asymmetrie im Verlauf etwa konstant bleibt. Die Polarität der Halbwelle, in der die MO-Varistoren ausfallen, ist unabhängig von der Höhe der Vorbelastung gleichverteilt. Somit ist kein Einfluss der Vorbelastung auf das Ausfallverhalten zu erkennen. Auch bei dieser Untersuchung zeigt sich keine signifikante Reduktion des Energieaufnahmevermögens durch die Vorbelastung mit Doppelexponentialstoßstrom der Form  $4/10 \mu\text{s}$ .

Es lässt sich festhalten, dass selbst bei Vorbelastungen mit Doppelexponentialstoßströmen der Form  $4/10 \mu\text{s}$ , die zu Änderungen der „charakteristischen Spannung“ im Bereich von 20 % bis 35 % führen, nur für einzelne MO-Varistoren ein reduziertes Energieaufnahmevermögen festgestellt werden kann. Somit ist eine reduzierte „charakteristische Spannung“ nicht zwangsläufig ein Indiz für Vorschädigungen, die bei einem Energieeintrag der untersuchten Energieeintragsarten eine Auswirkung auf das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen haben. Ungeachtet dessen hat eine Reduktion der „charakteristischen Spannung“ in der beobachteten ausgeprägten Höhe einen Einfluss auf das thermische Energieaufnahmevermögen, was bei der Festlegung der Dauer- und Bemessungsspannung (siehe [IEC60099-4]) beachtet werden muss. Offensichtlich ist dieses Problem jedoch lösbar, da baugleiche der untersuchten MO-Varistoren erfolgreich in Überspannungsableitern der Mittelspannungsebene eingesetzt werden und die Arbeitsprüfungen nach [IEC60099-4] und [IEEC62.11-2012] mit diesen bestanden werden.

Monitoringsysteme für Standard-Überspannungsableiter bewerten häufig den Leckstrom im Betrieb (siehe z. B. [Hei01]). Dass die resistive Komponente des Leckstroms ein Maß für die Degradation der MO-Varistoren im Überspannungsableiter darstellt, soll an dieser Stelle nicht in Frage gestellt werden. Jedoch zeigen die vorgestellten Untersuchungen, dass der Leckstrom nicht zwangsläufig ein Maß für das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen darstellt. Eine Zustandsbewertung des Einzelimpulsenergieaufnahmevermögens über die „charakteristische Spannung“ (d. h. die Veränderung der  $UI$ -Kennlinie im Leckstrombereich) erscheint somit nicht möglich.

### 5.5.2 Rückbildung von Kennlinienänderungen im Betrieb bei anliegender Dauerspannung

Wie im vorherigen Abschnitt dargestellt, zeigen MO-Varistoren, die mit Doppelexponentialstoßströmen der Form  $4/10 \mu\text{s}$  vorbelastet werden, unter Umständen keine Änderung des Einzelimpulsenergieaufnahmevermögens trotz deutlicher Änderung der  $UI$ -Kennlinie im

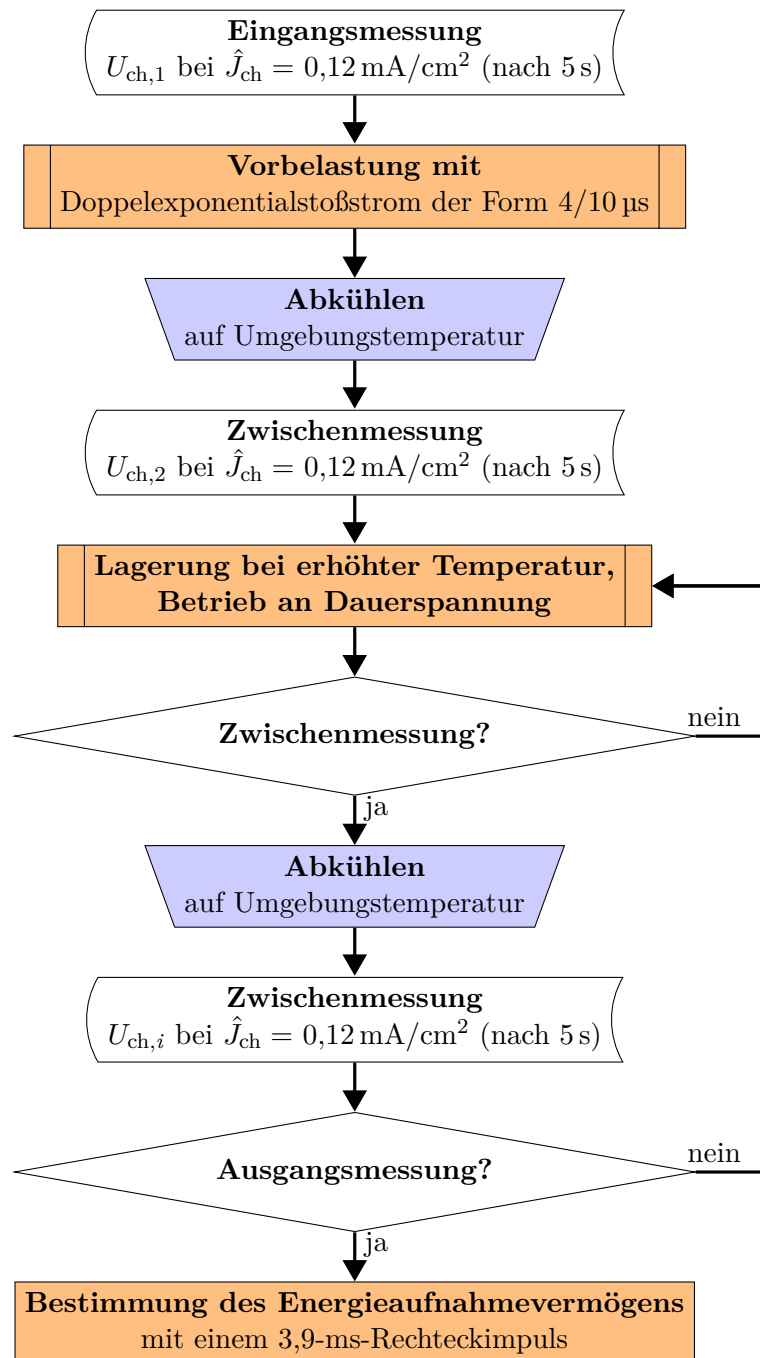
Vordurchbruchbereich. Aus diesem Grund liegt die Vermutung nahe, dass die Änderungen der *UI*-Kennlinie im Vordurchbruchbereich nach diesen Vorbelastungen ausschließlich auf Ladungsträgermigration und nicht auf mechanische Fehlstellen, wie etwa beginnende Schmelzkanäle, zurückzuführen sind. Stimmt diese Vermutung, müsste sich die Änderung der *UI*-Kennlinie zurückbilden lassen, da Ladungsträgermigration im Gegensatz zu mechanischen Fehlstellen eine reversible Materialänderung darstellt. Ziel der nachfolgenden Untersuchung ist es, zu prüfen, ob es sich tatsächlich um reversible Änderungen handelt, und, falls dies zutrifft, die Parameter zur Rückbildung einzugrenzen.

Aus vorangegangenen Untersuchungen wie [Den98] und [Kle04] ist bekannt, dass Änderungen der *UI*-Kennlinie im Vordurchbruchbereich bei Lagerung der MO-Varistoren bei erhöhter Temperatur und anliegender Spannung (im Bereich der Dauerspannung) unter Umständen zurückgebildet werden können. Dabei werden jedoch keine so drastischen Änderungen der *UI*-Kennlinie wie im nachfolgenden Abschnitt untersucht und der Einfluss der Spannung wird unterschiedlich bewertet.

Das Ablaufdiagramm der Untersuchung ist in *Abbildung 5.35* dargestellt. Untersucht werden MO-Varistoren der „Größe 2“, die zunächst alle einer Eingangsprüfung unterzogen werden. In dieser wird die „charakteristische Spannung“ bei einem Scheitelwert der Stromdichte von  $\hat{J}_{ch} = 0,12 \text{ mA/cm}^2$  bestimmt. Im Anschluss daran wird eine Vorbelastung mit einem Doppelexponentialstoßstrom der Form  $4/10 \mu\text{s}$  bei einer Stromdichte durchgeführt, wie sie in einer Arbeitsprüfung nach [IEC60099-4] vorkommen kann und zu einer Änderung der „charakteristischen Spannung“ der MO-Varistoren im Bereich von 12,5 % führt. Dies wird mit einer Zwischenmessung der auf Umgebungstemperatur abgekühlten MO-Varistoren überprüft.

Zur Rückbildung der Degradation werden die MO-Varistoren bei erhöhter Temperatur bzw. bei einer Spannung im Bereich der Dauerspannung über einen Gesamtzeitraum von 1000 h bis 1200 h gelagert/betrieben. Die Dauerspannung ist keine feste Größe, die im Bezug zu einer Eigenschaft des MO-Varistors steht, sondern eine Designgröße von Überspannungsableitern. Aus diesem Grund kann sie vom Hersteller frei gewählt werden und kann sich für den gleichen MO-Varistor in unterschiedlichen Überspannungsableitern unterscheiden. Bei der Wahl der Dauerspannung dienen Herstellerangaben als Orientierung. Die verwendete Spannung führt bei unbelasteten MO-Varistoren auf Umgebungstemperatur zu einer resistiven Komponente, die deutlich (um Faktoren) geringer ist als die kapazitive Komponente des Stromes.

Als Temperaturniveau werden 30 °C bzw. 115 °C verwendet, um einen Anhaltspunkt zu erhalten, wie sich die Prüflinge im Bereich der Umgebungstemperatur und bei der in



**Abbildung 5.35:** Ablaufdiagramm zur Bestimmung der Rückbildung von Änderungen der „charakteristischen Spannung“ in Folge von Doppelexponentialstoßstromvorbelastungen der Form 4/10 µs

der beschleunigten Alterungsprüfung nach [IEC60099-4] und [IEEEC62.11-2012] vorgeschriebenen Temperatur verhalten. Nach [IEC60099-4] kann durch eine Lagerung bei einer Temperatur von 115 °C für 1000 h eine Betriebszeit von mindestens 110 Jahren bei einem Betrieb bei maximal 40 °C nachbildet werden. Diese Hochrechnung setzt die Anwendbarkeit des Arrheniusgesetzes voraus, was auch in IEC stark umstritten<sup>145</sup> ist. Da bislang kein zuverlässiger Beschleunigungsfaktor identifiziert werden kann, liefert die genannte Hochrechnung der Betriebszeit lediglich einen Anhaltspunkt.

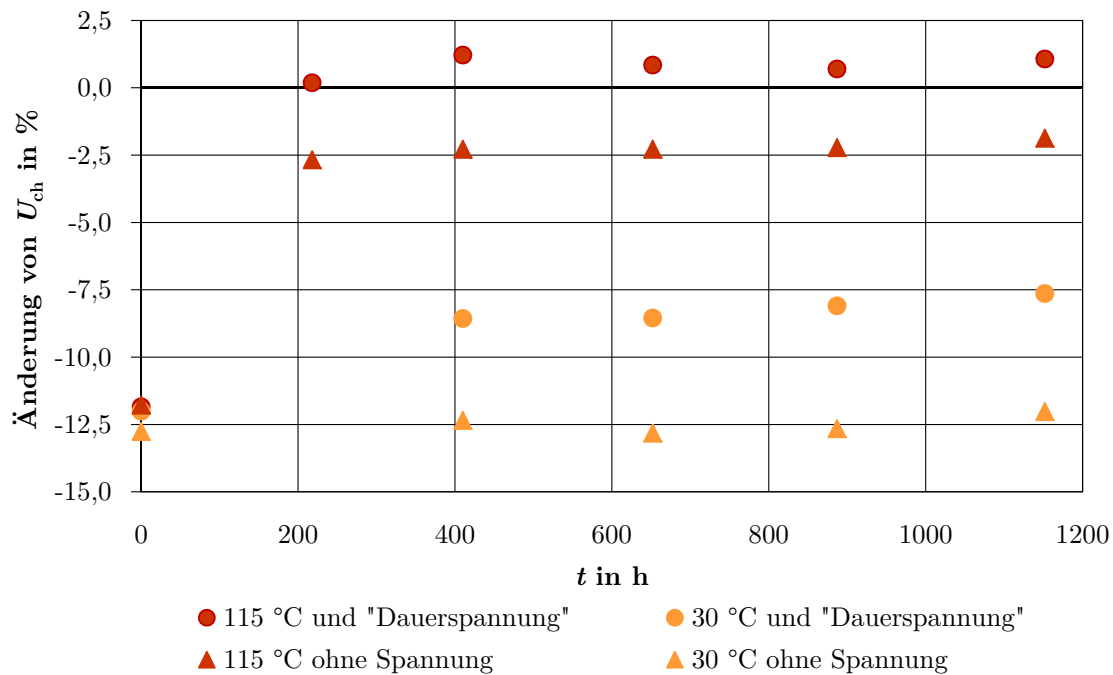
Da die Temperatur bei den mit Spannung belasteten MO-Varistoren abhängig von der umgesetzten Verlustleistung höher ist als die Lufttemperatur im Temperaturschrank, wird nur ein Prüfling pro Temperaturschrank an Spannung betrieben. Die Temperatur des MO-Varistors selbst wird überwacht und in einem Bereich von  $\pm 0,2$  K (ohne Berücksichtigung der Messunsicherheit des Temperaturmesssystems) um den Sollwert konstant gehalten.

In *Abbildung 5.36* ist beispielhaft die Rückbildung der „charakteristischen Spannung“ für vier MO-Varistoren dargestellt, wobei die Änderung auf den Wert vor der Vorbelastung mit einem Doppelexponentialstoßstrom der Form  $4/10 \mu\text{s}$  bezogen ist. Der dargestellte Zeitbereich stellt die Dauer der Belastung bei erhöhter Temperatur/Dauerspannung dar. Von den MO-Varistoren wird jeweils einer bei einer Temperatur von 115 °C bzw. 30 °C sowie ohne Spannung bzw. bei einer Spannung im Bereich der Dauerspannung betrieben. Die Bestimmung der „charakteristischen Spannung“ wird etwa alle 220 h durchgeführt, und dazu werden die MO-Varistoren auf Umgebungstemperatur abgekühlt. Um zu prüfen, ob die Zwischenmessungen das Rückbildungsverhalten beeinflussen, wird eine Vergleichsuntersuchung ohne Zwischenmessungen durchgeführt. In dieser kann kein auflösbarer Unterschied im Rückbildungsverhalten nachgewiesen werden.

In einer weiteren Voruntersuchung werden MO-Varistoren, die keiner Vorbelastung mit einem Doppelexponentialstoßstrom der Form  $4/10 \mu\text{s}$  ausgesetzt waren, für 1000 h bei einer Spannung im Bereich der Dauerspannung bei 30 °C bzw. 115 °C betrieben. Diese zeigen durch die „Alterung“ eine Änderung der „charakteristischen Spannung“ im Bereich von 1 % bis 2 %. Hierbei nimmt die Asymmetrie des Stromverlaufes bei anliegender „charakteristischer Spannung“ im Verlauf der „Alterung“ ab.

Die in *Abbildung 5.36* dargestellte Änderung der „charakteristischen Spannung“ zum Zeitpunkt „0 h“ stellt die Änderung infolge der energetischen Vorbelastung dar. Der MO-Varistor, der ohne anliegende Spannung bei einer Temperatur von 30 °C gelagert wird zeigt im Laufe der Lagerung nur einen sehr geringen Rückgang der „charakteristischen

<sup>145</sup> Beispielsweise wird in [Cig13a] diskutiert, dass der Verlustleistungsverlauf von langzeitstabilen MO-Varistoren nicht dem Arrheniusgesetz folgt.



**Abbildung 5.36:** Rückbildung der „charakteristischen Spannung“ bei Lagerung bei erhöhter Temperatur und Betrieb an einer Spannung im Bereich der Dauerspannung. Die Änderung der „charakteristischen Spannung“ ist auf die im unbelasteten Zustand des jeweiligen MO-Varistors bezogen.

Spannung“. Hingegen zeigt der bei der gleichen Temperatur an einer Spannung im Bereich der Dauerspannung betriebene MO-Varistor einen deutlicheren Rückgang im Verlauf der Belastung. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die deutlichste Änderung innerhalb der ersten 400 h auftritt.

Die bei einer Temperatur von 115 °C gelagerten MO-Varistoren zeigen einen wesentlich deutlicheren Rückgang der „charakteristischen Spannung“, wobei auch hier die größte Reduktion innerhalb der ersten 200 h auftritt. Bei Betrieb an Spannung ist der Rückgang größer als ohne Spannung, jedoch ist der Unterschied kleiner als bei den MO-Varistoren, die bei 30 °C gelagert/betrieben werden. Die Änderung der „charakteristischen Spannung“ erreicht, in Bezug auf jene vor der Vorbelastung mit einem Doppelsexponentialstoßstrom der Form  $4/10\mu\text{s}$ , für den MO-Varistor, der bei einer Temperatur von 115 °C an Spannung betrieben wird, bereits nach 200 h positive Werte. Dies bedeutet, dass die „charakteristische Spannung“ ab diesem Zeitpunkt höher ist als vor der Vorbelastung, was sich durch die Rückbildung der durch die Stückprüfung eingprägten Änderungen der  $UI$ -Kennlinie (wie bereits in den vorhergehenden Kapiteln erläutert) erklären lässt.

Nach der Lagerung/„Alterung“ wird das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen mit einem Rechteckimpuls mit einer Scheiteldauer von 3,9 ms bis zur mechanischen Zerstörung bestimmt. Aufgrund der geringen Stückzahl an geprüften MO-Varistoren die vergleichbar belastet wurden, ist hier jedoch kein klares Bild zu erkennen.

Durch die vorgestellten Ergebnisse<sup>146</sup> wird die Vermutung bestätigt, dass sich Änderungen der *UI*-Kennlinie, die durch die Stückprüfung (z. B. die Restspannungsmessung mit einem Blitzstoßstrom) oder anderen Vorbelastungen mit hohen Stromscheitelwerten bzw. Stromsteilheiten in MO-Varistoren eingebracht werden, durch spannungsloses Lagern bei Temperaturen im Bereich der Umgebungstemperatur nur in sehr geringem Maße zurückbilden. Lagerung bei höheren Temperaturen und/oder anliegende Spannung beschleunigen den Rückbildungsprozess, wobei bei den gewählten Werten die Temperatur einen wesentlich stärkeren Einfluss hat als die angelegte Spannung. Nach [Den98] lässt sich dies dadurch erklären, dass der Rückbildungs-/Erholungsvorgang auf einen Diffusionsvorgang zurückzuführen ist, der durch höhere Temperaturen stärker als durch anliegende Spannung beschleunigt wird. Die während einer Impulsbelastung vom Korn in die Korngrenze migrierten Sauerstoffionen<sup>147</sup> führen demnach in der Erholungsphase die entgegengesetzte Bewegung aus, bis das ursprüngliche Gleichgewicht wieder hergestellt ist. Dabei spielt die temperaturabhängige Sauerstoffionenleitfähigkeit des  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  (siehe [Stu90]) die größte Rolle.

Die durch Vorbelastungen mit Doppel exponentialstoßströmen der Form  $4/10 \mu\text{s}$  (mit den gewählten Werten) erzeugten Änderungen der *UI*-Kennlinie im Vordurchbruchbereich, sind offensichtlich reversibel und reduzieren das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen nicht (siehe Kapitel 5.5.1). Die Dauer der Rückbildung hängt dabei entscheidend von der Temperatur der MO-Varistoren und der angelegten Spannung während des Erholungsprozesses ab. Es sei angemerkt, dass der Abkühlprozess bei Überspannungsableitern in elektrischen Energieversorgungsnetzen nach einem Energieeintrag mehr Zeit in Anspruch nimmt als während der vorgestellten Untersuchungen im Labor. Dies liegt zum einen daran, dass im Regelfall der Überspannungsableiter während des Abkühlprozesses weiter an der Systemspannung betrieben wird und somit elektrische Verlustleistung in ihm umgesetzt wird, die durch die erhöhte Temperatur des Überspannungsableiter größer ist als im unbelasteten Zustand. Zum anderen wirkt das Gehäuse des Überspannungsableiter thermisch isolierend, was den Abkühlprozess verlängert. Somit ist davon auszugehen, dass die Rückbildung der *UI*-Kennlinie im Vordurchbruchbereich in Folge des länger andauernden Abkühlprozesses

<sup>146</sup> Die Tendenz der Untersuchungen konnte durch weitere Untersuchungen mit variierten Werten bestätigt werden.

<sup>147</sup> Dieser Effekt ist in Kapitel 2.2 unter dem Stichwort „heiße Elektronen“ beschrieben.

bei einem Überspannungsableiter im Energieversorgungsnetz größer ausfallen wird, als die im Labor beobachtete.

Es ist davon auszugehen, dass die hier untersuchte Belastung eine extreme Belastung darstellt und Überspannungsableiter in elektrischen Energieversorgungsnetzen mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht mit solch hohen Stromspitzenwerten belastet werden (siehe [Cig13b]). Somit werden Überspannungsableiter in elektrischen Energieversorgungsnetzen vermutlich nicht mit so deutlichen (wie den hier untersuchten) Änderungen der *UI*-Kennlinie betrieben.

### 5.5.3 Energieaufnahmevermögen von im Betrieb gealterten MO-Varistoren

In den vorangegangenen Untersuchungen wurden die Auswirkungen von Energieeinträgen auf MO-Varistoren untersucht und hier insbesondere das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen betrachtet. Da die Belastungen von Überspannungsableitern in elektrischen Energieversorgungsnetzen vielfältig aber nur lückenhaft dokumentiert sind, lässt sich die Praxisrelevanz der zuvor beschriebenen Untersuchungen ohne ergänzende Betrachtungen nur schwer einschätzen. In diesem Abschnitt werden MO-Varistoren aus Überspannungsableitern untersucht, die mehrere Jahre in Betrieb und somit realen Belastungen ausgesetzt waren. Die Untersuchung hat zum Ziel, einen Eindruck zu gewinnen, ob das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen durch die während der Betriebszeit auftretenden Belastungen reduziert wird.

Die tatsächlichen Belastungen, die während der Betriebszeit von Überspannungsableitern aufgetreten sind, lassen sich im Nachhinein nur schwer nachvollziehen. Nur die wenigsten der am Markt erhältlichen Monitoringsysteme für Überspannungsableiter werten Energieeinträge aus, bzw. diese werden uneinheitlich dokumentiert. Weiterhin unterscheidet sich das Vorgehen zur Auswertung von Monitoringsystemen zwischen verschiedenen Übertragungsnetzbetreibern. Aus diesem Grund können die energetischen Belastungen durch Überspannungsereignisse der untersuchten Überspannungsableiter (die beispielsweise mit Kontrollfunkenstrecken ausgerüstet waren) nur mit einer sehr großen Unsicherheit angegeben werden. Einzig die Belastung der Überspannungsableiter mit Betriebsspannung kann als Belastung während der Betriebsdauer vorausgesetzt werden.

Für die Untersuchung stehen MO-Varistoren aus Überspannungsableitern der Höchstspannungsebene (240 kV bzw. 380 kV) mit einsäuligem Aktivteil von drei verschiedenen Herstellern zur Verfügung. Von dem jeweiligen Übertragungsnetzbetreiber stehen Informationen zur Betriebsdauer, Außerbetriebnahme, Standort der Überspannungsableiter sowie



**Tabelle 5.8:** Historie der untersuchten Überspannungsableiter nach Auskunft der jeweiligen Netzbetreiber.

	Ü1	Ü2	Ü3	Ü4	Ü5	Ü6	Ü7	Ü8	Ü9
Anzahl	3	3	3	3	3	1	1	3	2
Baujahr	1988	1992	1994	1994	1997	1997	1997	1997	1998
Betriebsjahre	1 <sup>a</sup>	19	17	15	13	12	6	9	12
Belastung <sup>b</sup>	keine	keine	unklar	1-2	unklar	unklar	1 <sup>c</sup>	keine	keine

<sup>a</sup> Aufgrund des Baujahres und des Datums der Außerbetriebnahme ist zu vermuten, dass diese Überspannungsableiter deutlich länger als ein Jahr in Betrieb waren.

<sup>b</sup> Die tatsächliche Belastung ist unklar. Es ist zu vermuten, dass die Überspannungsableiter häufiger als hier angegeben belastet wurden.

<sup>c</sup> Die Belastung führte zu einem unentdeckten mechanischen Ausfall einzelner MO-Varistoren des Überspannungsableiters.

häufig die verwendeten Monitoringsysteme zur Verfügung. Die untersuchten Überspannungsableiter werden im Folgenden mit „Ü1“ bis „Ü9“ bezeichnet. Hierbei sind bei „Ü1“ bis „Ü5“ und „Ü8“ jeweils die drei baugleichen Überspannungsableiter der drei Phasen eines Systems unter einer Bezeichnung zusammengefasst. Alle 22 untersuchten Überspannungsableiter waren im Betrieb ausnahmslos unauffällig, keiner (auch nicht der Überspannungsableiter „Ü7“) wurde aufgrund von Auffälligkeiten außer Betrieb genommen.

Die zur Verfügung gestellten Informationen zur Vorgeschichte der untersuchten Überspannungsableiter sind in *Tabelle 5.8* dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Mehrzahl der untersuchten Überspannungsableiter in den 1990er Jahren hergestellt wurde und nach Aussage des jeweiligen Übertragungsnetzbetreibers bis zur Außerbetriebnahme 6 bis 19 Jahre in Betrieb waren<sup>148</sup>. Die aus den Monitoringsystemen gewonnenen Informationen über vorangegangene Belastungen sind in der letzten Zeile der Tabelle dargestellt. Diese Informationen bergen eine sehr große Unsicherheit, wie dem vorangegangenen Absatz über Monitoringsysteme zu entnehmen ist. Es ist sehr unwahrscheinlich, dass die Überspannungsableiter in einer so großen Anzahl an Betriebsjahren so wenigen Belastungen ausgesetzt waren. Der Überspannungsableiter mit der Bezeichnung „Ü7“ enthielt einzelne ausgefallene MO-Varistoren, deren Ausfallspuren auf eine elektrische Überlastung hindeuten.

Um das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen der in den Überspannungsableitern enthaltenen MO-Varistoren zu bestimmen und mit dem von aktuellen fabrikneuen MO-Varistoren vergleichen zu können, wird die Untersuchung, wie in Kapitel 5.1 vorgestellt, durchgeführt. Dementsprechend ist das Ablaufdiagramm Abbildung 5.1 zu entnehmen. Die Anzahl

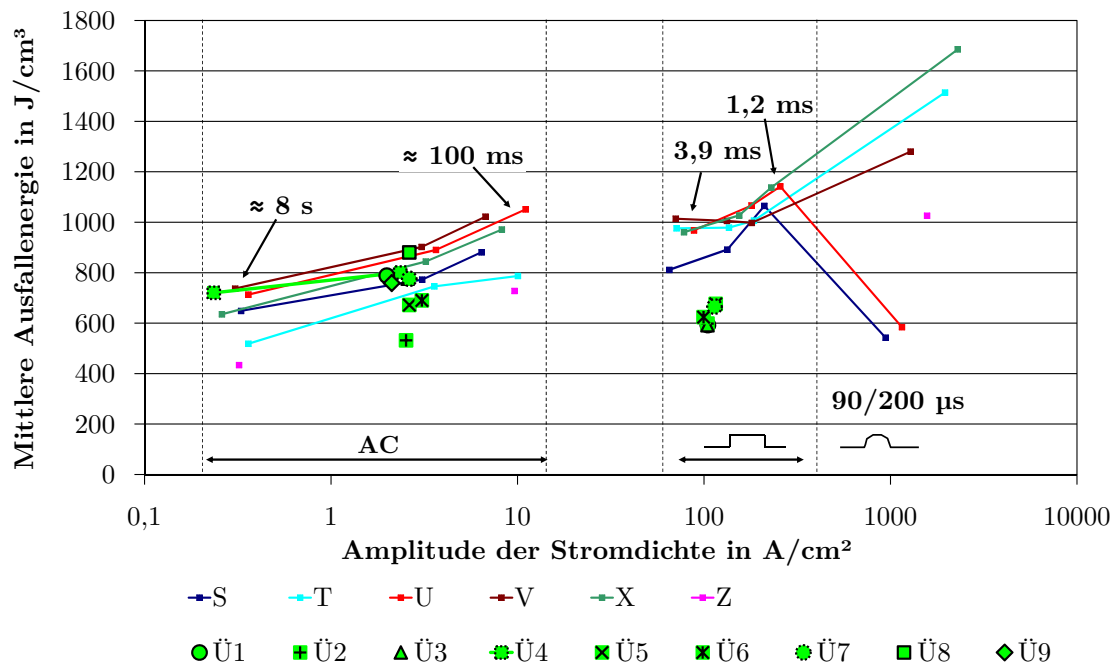
<sup>148</sup> Ältere Überspannungsableiter konnten nicht zur Verfügung gestellt werden.

der in den Überspannungsableitern enthaltenen MO-Varistoren ist (je nach Bemessungsspannung der Überspannungsableiter und  $UI$ -Kennlinie der enthaltenen MO-Varistoren), unterschiedlich für die Überspannungsableiter „Ü1“ bis „Ü9“. Aus den meisten Überspannungsableitersätzen können jeweils etwa 100 MO-Varistoren für die Untersuchungen verwendet werden. Allerdings können versuchsanlagenbedingt nicht alle MO-Varistortypen mit allen Impulsformen bis zum Grenzbereich des Energieaufnahmevermögens belastet werden. Aus diesem Grund werden nicht alle Belastungsarten aus Kapitel 5.1 durchgeführt, sondern lediglich Wechselstromenergieeinträge mit einem Scheitelwert der Stromdichte<sup>149</sup> von etwa  $3,5 \text{ A/cm}^2$  und Rechteckimpulse mit einer Scheiteldauer von etwa 1,9 ms. Hierbei wird wie in Kapitel 5.1 für die Rechteckimpulse das „komplexe Fehlerkriterium“ angewandt, wohingegen bei Wechselstromenergieeinträgen die MO-Varistoren bis zur mechanischen Zerstörung belastet werden. Für die Wechselstromenergieeinträge werden pro Stromdichte jedes Überspannungsableitersatzes 50 MO-Varistoren belastet, wohingegen bei den Rechteckimpulsen 40 MO-Varistoren belastet werden.

Das mittlere Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen der MO-Varistoren aus den beschriebenen Überspannungsableitern ist im Vergleich zu dem von fabrikneuen MO-Varistoren der „Größe 1“ in *Abbildung 5.37* dargestellt. Es liegen keine Informationen darüber vor, wie hoch das mittlere Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen der aus den Überspannungsableitern entnommenen MO-Varistoren im Neuzustand war. In Kapitel 5.1 (siehe *Abbildung 5.2*) ist das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen der Produktionslose „S“ bis „Z“ im Vergleich zu den in [Rin97] dargestellten Untersuchungsergebnissen diskutiert worden. Dabei wurde vermutet, dass das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen der in den 1990er Jahren hergestellten MO-Varistoren (siehe [Rin97]) vermutlich etwas geringer war als das der Produktionslose „S“ bis „Z“. Da beide jedoch im selben Bereich liegen, wird das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen der Produktionslose „S“ bis „Z“ in *Abbildung 5.37* als Referenz für das der aus den Überspannungsableitern entnommenen MO-Varistoren verwendet.

Es ist zu erkennen, dass das mittlere Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen der Wechselstromenergieeinträge im Wesentlichen im Bereich der Streubreite der zuvor untersuchten fabrikneuen MO-Varistoren liegt. Lediglich die MO-Varistoren aus den Überspannungsableitern „Ü2“ weisen ein geringeres Energieaufnahmevermögen auf. Bei diesen zeigt sich ein zu dem in *Abbildung 5.5* dargestellten vergleichbares Verhalten: Die MO-Varistoren fallen bei zwei unterschiedlichen klar voneinander unterscheidbaren Energieniveaus aus, etwa  $350 \text{ J/cm}^3$  und etwa  $700 \text{ J/cm}^3$ . Auch hier werden Inhomogenitäten, die bei dieser

<sup>149</sup> Das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen der MO-Varistoren aus den Überspannungsableitern „Ü4“ wird auch mit einem Wechselstromenergieaufnahmevermögen mit einem Scheitelwert der Stromdichte von etwa  $0,35 \text{ A/cm}^2$  bestimmt.



**Abbildung 5.37:** Mittleres Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen der untersuchten Überspannungsableiter im Vergleich zu dem mittleren Energieaufnahmevermögen fabrikneuer MO-Varistoren der „Größe 1“ (vgl. Kapitel 5.1)

Stromdichte zu einer Strompfadkonzentration führen, als Ursache vermutet. Die Auswertung der Ausfallbilder zeigt auch in diesem Fall keine Auffälligkeiten und insbesondere keine Korrelation zwischen dem Energieaufnahmevermögen und dem Ausfallbild.

In zusätzlichen Untersuchungen können keine signifikanten Abweichungen zwischen dem Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen bei Belastungen mit den beschriebenen Wechselstromenergieeinträgen von MO-Varistoren aus verschiedenen Baugliedern eines Überspannungsableiters festgestellt werden. Die Unterschiede im Energieaufnahmevermögen bei dieser Belastungsform sind zwischen den MO-Varistoren unterschiedlicher Überspannungsableiter eines Überspannungsableitersatzes ebenfalls nicht messbar.

Bei den Rechteckimpulsbelastungen zeigen die MO-Varistoren von den sechs mit dieser Belastung untersuchten Überspannungsableitern ein deutlich geringeres Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen als fabrikneue MO-Varistoren, das jedoch noch weit über typischen Nennenergieaufnahmevermögen von Standard-Überspannungsableitern liegt. Hier ist die Reduktion der „charakteristischen Spannung“ die bei weitem dominierende Ausfallursache. Wie Abbildung 5.3 zu entnehmen, ist dies bei den fabrikneuen MO-Varistoren (produktionslosabhängig) nur in einem deutlich geringerem Maße der Fall. Vermutlich hat die

Belastung mit der Betriebsspannung während des Betriebs im Energieversorgungsnetz, Änderungen der *UI*-Kennlinie, die durch die Stückprüfung der MO-Varistoren eingebracht wurden, zurückgebildet. Wie bekannt ist (siehe z. B. [Den98] und [Kle04]), verursacht bei aufeinanderfolgenden Impulsbelastungen der erste Impuls die stärkste Änderung der *UI*-Kennlinie. Aus diesem Grund erzeugen die verwendeten Energieeinträge an den fabrikneuen MO-Varistoren, die noch die Ladungsträgerverschiebungen infolge der Stückprüfung enthalten, eine geringere Reduzierung der „charakteristischen Spannung“ als bei den MO-Varistoren aus den Überspannungsableitern „Ü1“ bis „Ü9“.

Die Überspannungsableiter, die nach den Monitoringsystemen energetischen Belastungen während des Betriebes ausgesetzt waren, zeigen keine Auffälligkeiten im Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen. Selbst die aus dem Überspannungsableiter „Ü7“ (der mechanisch ausgefallene MO-Varistoren enthielt) entnommenen MO-Varistoren ohne optisch erkennbare Ausfallspuren zeigen das gleiche Verhalten des Einzelimpulsenergieaufnahmevermögens wie die aus den übrigen Überspannungsableitern.

Die Anzahl der untersuchten Überspannungsableiter bildet sicher keine repräsentative Stichprobe, und über die energetischen Vorbelastungen der Überspannungsableiter liegen nur unzureichende Informationen vor. Dennoch lässt sich festhalten, dass selbst bei einer Belastung<sup>150</sup>, die zum mechanischen Ausfall einzelner MO-Varistoren in einem Überspannungsableiter führt, keine Reduktion des Einzelimpulsenergieaufnahmevermögens bei Wechselstromenergieeinträgen im untersuchten Bereich festgestellt werden kann. Im Bereich, der mit Rechteckimpulsen untersucht wird, ist zwar eine deutliche Reduktion des Einzelimpulsenergieaufnahmevermögens festzustellen, diese ist jedoch auf Änderungen der „charakteristischen Spannung“ zurückzuführen. Das Ausfallkriterium und die Höhe der mittleren Ausfallenergien deuten auch in diesem Bereich darauf hin, dass nie eine Gefahr für den sicheren Betrieb der Überspannungsableiter bestand.

Einzig der Überspannungsableiter „Ü7“, der im Betrieb offenbar einer hohen energetischen Belastung ausgesetzt war und vermutlich infolgedessen einzelne mechanisch ausgefallene MO-Varistoren enthielt, war durch die ausgefallenen MO-Varistoren in der Funktionalität eingeschränkt. Es ist jedoch bemerkenswert, dass sich dieser Überspannungsableiter, trotz des Ausfalls von etwas weniger als 10 % der verbauten MO-Varistoren, im Energieversorgungsnetz unauffällig verhielt. Da dessen Funktionalität eingeschränkt ist und die Ausfallursache nicht eingegrenzt werden konnte, sollte untersucht werden, ob es weitere ähnlich gelagerte Fälle in elektrischen Energieversorgungsnetzen gibt.

---

<sup>150</sup> Die Art des Energieeintrags, Stromdichte, Kurvenform etc. ließ sich nicht rekonstruieren.

## 6 Zusammenfassung

Die Struktur und der Leitungsmechanismus von MO-Varistoren sind sehr weit erforscht, auch wenn nicht alle Wirkmechanismen der verwendeten Additive etc. in allen Einzelheiten bekannt sind. Weiterhin ist in vorangegangenen Untersuchungen das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen über weite Strombereiche experimentell bestimmt und mit Simulationen bestätigt worden. Demnach steigt das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen mit steigender Belastungsstromdichte im Durchbruchbereich der *UI*-Kennlinie an, bis ggf. bei sehr hohen Stromdichten das Durch-/Überschlagverhalten der Glasur die Belastungsmöglichkeit begrenzt. Bei Doppelsexponentialstoßstrombelastungen wurden neben mechanischen Aspekten auch zunehmend Änderungen der *UI*-Kennlinie der belasteten MO-Varistoren festgestellt.

Die bislang untersuchten Mehrfachbelastungen beschränkten sich hauptsächlich auf multiple Doppelsexponentialstoßstrombelastungen mit hohen Stromdichten sowie hohen Stromsteilheiten. Bei diesen wurden, neben den bereits angesprochenen Änderungen der *UI*-Kennlinie, mit zunehmender Belastung verstärkt Durchschläge durch die Glasur der MO-Varistoren beobachtet.

In den in der vorliegenden Arbeit vorgestellten Untersuchungen konnte gezeigt und ein physikalisches Modell dafür vorgestellt werden, dass bei hohen Stromdichten ein positiver Temperaturkoeffizient des Widerstandes vorliegt, d. h. dass sich die *UI*-Kennlinie von MO-Varistoren bei höherer Temperatur hin zu höheren Spannungen bei gleicher Stromdichte verschiebt. Die Verschiebung der *UI*-Kennlinie ist nur schwach ausgeprägt, nicht konstant bei unterschiedlichen Temperaturen und unterscheidet sich zudem zwischen den beiden hier untersuchten MO-Varistorkeramiken.

Die Temperaturabhängigkeit der *UI*-Kennlinie hat jedoch nur geringe Auswirkungen auf das Energieaufnahmevermögen von MO-Varistoren bei energetischen Belastungen. Bei paralleler Belastung von mehreren MO-Varistoren, deren unterschiedliche *UI*-Kennlinie zu Belastungsstromdichten führte, die sich um etwa ein Drittel unterscheiden, zeigte sich nur eine verhältnismäßig geringe Angleichung der Stromdichten während der Belastung mit Rechteckimpulsen.

Die Untersuchung des Energieaufnahmevermögens von vorgewärmten MO-Varistoren zeigt zwar Unterschiede für die elektrisch einbringbare Energie bei verschiedenen Starttemperaturen, jedoch kann im untersuchten Stromdichtebereich keine Auswirkung der Temperaturabhängigkeit der *UI*-Kennlinie auf das Energieaufnahmevermögen festgestellt werden. Offensichtlich ist für das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen die Stromaufteilung aufgrund der Mikrostruktur des MO-Varistors maßgebend, während die Temperaturabhängigkeit der *UI*-Kennlinie nur eine untergeordnete Rolle spielt.

Das Energieaufnahmevermögen bei Doppelimpulsbelastungen wurde im zeitlichen Übergangsbereich zwischen Einzelimpulsbelastungen und repetierenden Belastungen mit Abständen der Einzelbelastungen von bis zu 3 s untersucht. Hierbei wurde bei der untersuchten Stromdichte das gleiche Energieaufnahmevermögen bei Einzelimpulsbelastungen sowie bei Doppelimpulsbelastungen mit den genannten Zeitabständen ermittelt. Somit kann davon ausgegangen werden, dass bei Doppelimpulsbelastungen im Zeitraum zwischen den Impulsen die Wärmeverteilung im MO-Varistor nicht nennenswert verbessert werden kann. Aus diesem Grund sind bei kurz aufeinanderfolgenden Energieeinträgen, bis zu Zeiträumen, bei denen ein nennenswerter Wärmeabtransport von den MO-Varistoren an die Umgebung eintritt, die Belastungen aufzusummieren, um die äquivalente Gesamtbelastung für den MO-Varistor zu bestimmen. Dies war für die Auswirkungen auf die thermische Stabilität von Überspannungsableitern bereits bekannt, bislang jedoch noch nicht für das Impulsenergieaufnahmevermögen.

Der Schwerpunkt der vorgestellten Untersuchungen liegt auf den Untersuchungen der repetierenden Energieeinträge, bei welchen die MO-Varistoren zwischen den Energieeinträgen bis auf Umgebungstemperatur abgekühlt werden. Hier konnte nachgewiesen werden, dass kein festes Verhältnis zwischen der repetierenden und der Einzelimpulsbelastbarkeit besteht. In der Untersuchung wurden MO-Varistoren von drei verschiedenen Produktionslosen (unterschiedlicher Hersteller bzw. unterschiedlicher Typen) mit 100 repetierenden Wechselstromenergieeinträgen bei einem Scheitelwert der Stromdichte von  $3,5 \text{ A/cm}^2$  belastet. Dieser Stromdichtebereich wurde verwendet, da er z. B. bei Überspannungsableitern zum Schutz von Kondensatoren in Serienkompensationsanlagen bei dieser Belastungsart auftreten kann. Während der Vorbelastungen fielen einzelne MO-Varistoren von zwei der drei untersuchten Produktionslose aus. In der Ausgangsmessung zeigten die vorbelasteten MO-Varistoren jedoch keine Vorschädigung, die das Energieaufnahmevermögen beeinflussen würden. Daraus wird geschlossen, dass Wechselstromenergieeinträge bei der genannten Stromdichte MO-Varistoren, wenn überhaupt, dann nur gering ermüden (einzelne Ausfälle während der Vorbelastungen sind möglicherweise auf Fehlstellen in den MO-Varistoren zurückzuführen).

Bei repetierenden Rechteckimpulsen mit einer höheren Stromdichte und einer geringeren Energieeintragsdauer zeigte sich, dass der prozentuale Unterschied zwischen der Einzel- und der repetierenden Impulsbelastbarkeit der MO-Varistoren größer ist als bei den zuvor erwähnten Wechselstromenergieeinträgen. Hingegen liegen die Energieniveaus, bei denen einzelne MO-Varistoren einer Gruppe von beispielsweise zehn MO-Varistoren bei repetierenden Energieeinträgen ausfallen, für beide Energieeintragsarten/Stromdichten in einem ähnlichen Bereich.

Aus diesem Grund wurde beispielhaft in einer systematischen Untersuchung die Belastbarkeit von MO-Varistoren mit Wechselstromenergieeinträgen mit einer Dauer von etwa 80 ms, Rechteckimpulsen mit einer Scheiteldauer von 1,9 ms und Doppelsexponentialstoßströmen der Form 90/200  $\mu$ s untersucht. Dabei wurde das Energieniveau bei allen Energieeintragsarten im gleichen Bereich von 200 J/cm<sup>3</sup> bis 400 J/cm<sup>3</sup> variiert. Hierbei zeigt sich, dass kürzere Belastungen mit höherer Stromdichte die MO-Varistoren stärker vorschädigen als die Wechselstromenergieeinträge. Dies äußert sich in der Ausfallhäufigkeit während der Vorbelastungen und dem Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen nach 20 Vorbelastungen. Offensichtlich ist bei den repetierenden Belastungen der Grad der Stromverteilung im MO-Varistor von untergeordneter Relevanz. Ob die bei kürzeren Energieeinträgen auftretenden mechanischen Spannungen zu mechanischen Vorschädigung im MO-Varistor führen, konnte nicht eindeutig nachgewiesen werden.

Die Auswertung der Ausfallhäufigkeiten und des Einzelimpulsenergieaufnahmevermögens nach repetierenden Vorbelastungen deuten weiter darauf hin, dass Belastungen mit geringerer Stromdichte besser zur Detektion von MO-Varistoren mit geringerem Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen, sogenannten Ausreißern, geeignet sind als Belastungen mit hoher Stromdichte. Die verwendeten Wechselstromenergieeinträge führen vermutlich bei Ausreißern schon bei geringeren Impulszahlen (häufig dem ersten) zum Ausfall. Ferner scheinen sie die MO-Varistoren weniger stark vorzuschädigen als Energieeinträge höherer Stromdichte des gleichen Energieniveaus. Als Grund für das selektive Ausfallverhalten wird das bei der verwendeten Stromdichte günstigere Verhältnis aus Strompfadkonzentration und Wärmausgleich innerhalb des MO-Varistors während des Energieeintrags vermutet. Dies wird durch die Untersuchungen der Streubreite des Einzelimpulsenergieaufnahmevermögens von MO-Varistoren eines Produktionsloses unterstützt, bei denen ein Teil ein deutlich geringeres Energieaufnahmevermögen zeigt. Diese MO-Varistoren wurden mit unterschiedlichen Stromdichten belastet, wobei bei einer Stromdichte von etwa 3,5 A/cm<sup>2</sup> die deutlichsten Unterschiede im Energieaufnahmevermögen festzustellen sind.

Aus diesem Grund scheint die oben genannte Belastung auch besonders attraktiv für Stückprüfungen zu sein. Ein direkter Vergleich eines konventionellen Stückprüfverfah-

rens mit Rechteckimpulsen zu Wechselstromenergieeinträgen des gleichen Energieniveaus zeigte, aufgrund der geringen Anzahl an MO-Varistoren mit geringerem Energieaufnahmevermögen, allerdings keinen signifikanten Unterschied in der Selektivität der beiden Verfahren. Damit steht der abschließende Nachweis des Vorteils eines Stückprüfverfahrens mit Wechselstromenergieeinträgen noch aus.

Außer mechanischen Vorschädigungen können bei Vorbelastungen insbesondere mit hohen Stromdichten und Stromsteilheiten Änderungen der *UI*-Kennlinie im Vordurchbruchbereich erzeugt werden. In früheren Untersuchungen wurde eine Korrelation zwischen dem Stromscheitelwert einer Vorbelastung mit einem Doppelexponentialstoßstrom der Form  $4/10\text{ }\mu\text{s}$  und der durch diese erzeugte Änderung der „charakteristischen Spannung“ (vergleichbar mit Referenzspannung) festgestellt. Die hier weiterführend vorgestellten Untersuchungen zeigen jedoch keinen Zusammenhang zwischen der Änderung der *UI*-Kennlinie und dem Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen. Offensichtlich bewirkt die aus der Literatur bekannte Migration der Sauerstoffionen infolge von Stoßstrombelastungen hoher Stromdichte und Stromsteilheit keine Reduktion des Energieaufnahmevermögens, bzw. die untersuchten Vorbelastungen erzeugen keine Vorschädigungen, die zu einer Reduktion des Energieaufnahmevermögens beitragen würde.

Diese Änderungen der *UI*-Kennlinie, die durch Doppelexponentialstoßströme der Form  $4/10\text{ }\mu\text{s}$  eingebracht wurden, können unter Umständen durch Lagerung bei erhöhter Temperatur und betriebsfrequenter Wechselspannung zurückgebildet werden. Bei den Untersuchungen zeigte sich, dass bei den gewählten Werten (mit hoher Relevanz in Energieversorgungsnetzen) die Temperatur wahrscheinlich einen größeren Einfluss als die Spannung hat, was mit früher veröffentlichten Erkenntnissen in Einklang steht.

Exemplarisch wurde das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen von MO-Varistoren untersucht, die Überspannungsableitern der Hochspannungsebene entnommen worden waren, nachdem diese über Jahre in realen elektrischen Energieversorgungsnetzen eingesetzt gewesen waren. Diese MO-Varistoren zeigen bei Wechselstromenergieeinträgen im untersuchten Stromdichtebereich keine nennenswerten Unterschiede im Energieaufnahmevermögen zu aktuellen fabrikneuen MO-Varistoren. Bei Belastung mit Rechteckimpulsen zeigen sie schon bei geringeren Energieniveaus Änderungen der *UI*-Kennlinie, was jedoch aufgrund der vorgenannten Untersuchungsergebnisse als unkritisch eingestuft werden kann. Auch MO-Varistoren, die Überspannungsableitern entnommen wurden, die im Betrieb deutlichen energetischen Belastungen ausgesetzt waren, verhielten sich im Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen unauffällig.



## 6.1 Konsequenzen für den Einsatz von Überspannungsableitern

Mehrfachimpulsbelastungen mit langen Zeitabständen zwischen den Belastungen scheinen im Regelfall für Überspannungsableiter in Standardanwendungen bei den heute üblichen spezifizierten Nennenergien unkritisch zu sein. Die in den vorgestellten Untersuchungen identifizierten Energieeinträge, die zu Ermüdungserscheinungen führen, liegen fast ausschließlich höher und nur in seltenen Fällen leicht unter üblichen spezifizierten Nennenergien. Da die Energieniveaus, ab denen mit Ermüdung der MO-Varistoren zu rechnen ist, nur wenig oberhalb der üblichen spezifizierten Energieaufnahme liegt, erscheint ein Anheben von letzterer nicht möglich zu sein. In speziellen Anwendungen von Überspannungsableitern, wie als Leitungsableiter oder in Serienkompensationsanlagen, können spezielle Belastungen auftreten, weshalb diese gesondert betrachtet werden müssen.

Leitungsableiter sind möglicherweise verstärkt Energieeinträgen mit hohen Stromsteilheiten und Stromspitzenwerten ausgesetzt. Diese Energieeinträge haben bei den vorgestellten Untersuchungen bereits bei geringeren Energieniveaus zu Ermüdungserscheinungen geführt. Dies sollte bei der Auslegung und dem Betrieb von Leitungsableitern bedacht werden.

Überspannungsableiter zum Schutz von Kondensatoren in Serienkompensationsanlagen sind hauptsächlich Belastungen durch Wechselstromenergieeinträge ausgesetzt. Diese Belastungen mit geringen Stromspitzenwerten und Stromsteilheiten scheinen nach den vorgestellten Untersuchungsergebnissen MO-Varistoren nicht oder nur sehr gering zu ermüden. Bei diesen Überspannungsableitern wäre es somit möglich, höhere Energiedichten in den MO-Varistoren zu spezifizieren. Es muss jedoch beachtet werden, dass sich bei geringen Stromdichten Inhomogenitäten in den MO-Varistoren besonders stark auswirken und das Energieaufnahmevermögen herabsetzen. Aus diesem Grund wirken sich bei diesen Belastungen Ausreißer im Produktionslos mit geringerem Energieaufnahmevermögen besonders stark aus. Eine Anhebung der spezifizierten Nennenergie kann somit trotz geringem Ermüdungsrisiko der MO-Varistoren zu einem höheren Ausfallrisiko führen, da mit einer höheren Wahrscheinlichkeit das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen von einzelnen MO-Varistoren erreicht wird. Da letzteres von dem jeweiligen Hersteller bzw. Produktionslos abhängig ist, kann hier keine generelle Aussage getroffen werden.

Bei der Anwendung in Serienkompensationsanlagen kann es aufgrund der räumlichen Ausdehnung der Überspannungsableiterbänke zu Temperaturunterschieden zwischen MO-Varistorsäulen kommen. Diese führen im Bereich der untersuchten Stromdichten nur zu geringen Änderungen der Stromaufteilung zwischen den Säulen. Somit müssen Temperaturunterschiede bei der Betrachtung der Stromaufteilung im untersuchten Bereich nicht

weiter berücksichtigt werden.

Für Überspannungsableiter, die in Mittelspannungsnetzen eingesetzt werden, wurden in vorangegangenen Untersuchungen deutliche Änderungen der *UI*-Kennlinie im Vordurchbruchbereich bei Belastungen mit Doppel exponentialstoßströmen mit hohen Stromdichten und Stromsteilheiten beobachtet. Es ist davon auszugehen, dass in Energieversorgungsnetzen eingesetzte Überspannungsableiter keine so deutlichen Änderungen erfahren. Weiterhin ist in den hier vorgestellten Untersuchungen nachgewiesen worden, dass sich solche Änderungen im Betrieb zurückbilden können und diese das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen nicht zwangsläufig beeinflussen.

Diese Erkenntnis hat auch Auswirkungen auf das Erkennen von Vorschädigungen in Überspannungsableitern z. B. mit Hilfe von Monitoringsystemen. Es erscheint nicht in allen Fällen möglich, eine Vorschädigung von MO-Varistoren, die zu einer Reduktion des Einzelimpulsenergieaufnahmevermögens führt, zweifelsfrei durch eine Veränderung der *UI*-Kennlinie im Vordurchbruchbereich bestimmen zu können<sup>151</sup>.

Aus der abschließend vorgestellten Untersuchung zum Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen von MO-Varistoren aus Überspannungsableitern, die in Energieversorgungsnetzen betrieben wurden, kann geschlossen werden, dass sich deren Energieaufnahmevermögen nicht durch die im Betrieb aufgetretenen Belastungen reduziert. Somit erscheint ein Austausch von Überspannungsableitern nach einer entsprechenden Anzahl von Betriebsjahren, alleine aus Sorge um deren energetische Belastungsfähigkeit, nicht notwendig<sup>152</sup>. Allerdings zeigte der identifizierte Überspannungsableiter, der ausgefallenen MO-Varistoren enthielt auch, dass die Unversehrtheit unter Umständen von außen nur schwer einzuschätzen ist.

## 6.2 Empfehlungen für die internationale Normung

Die internationalen Normen für Überspannungsableiter der Mittel- und Hochspannungsebenen in IEC und IEEE haben sich auch in Bezug auf den Nachweis der Impulsbelastbarkeit in den letzten Jahren sehr stark weiterentwickelt. Sollte die Allgemeingültigkeit der in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungsergebnisse bestätigt werden, wird empfohlen, bei einer erneuten Überarbeitung von [IEC-37/416/FDIS] (bzw. der dann aktuellen IEC 60099-4) und [IEEEC62.11-2012] die nachfolgenden Empfehlungen einfließen zu lassen. Die Empfehlungen sind dabei aus wissenschaftlicher Sicht zu sehen.

<sup>151</sup> Die Auswirkungen von Änderungen der *UI*-Kennlinie auf das thermische Energieaufnahmevermögen sind hingegen unumstritten.

<sup>152</sup> Andere negative Einflüsse, wie z. B. Undichtigkeiten von Gehäusen, sind hier nicht betrachtet worden.

In dem „Test to verify the repetitive charge transfer rating“ in [IEC-37/416/FDIS] wird für NGLA und Überspannungsableiter der Mittelspannungsebene eine Wahlmöglichkeit für die Belastungsform über einen sehr großen Zeitbereich der Belastung ermöglicht. Dies scheint nicht zielführend, da nach den vorgestellten Untersuchungen kurze Belastungen (bei gleichem Energieinhalt) MO-Varistoren wesentlich stärker ermüden als längere Belastungen mit geringerer Stromdichte. Sollten sich diese Untersuchungen auch bei gleichem Ladungstransport der Belastungen bestätigen (was zu vermuten ist), dann sollte diese Wahlmöglichkeit überdacht werden. Dabei erscheint es sinnvoll, die Wahlmöglichkeit auf Grund der Anwendung auf kürzere Energieeinträge einzugrenzen.

Das Ergebnis des „Test to verify the repetitive charge transfer rating“ in [IEC-37/416/FDIS] und des „Single-impulse withstand rating test“ in [IEEEC62.11-2012] wird durch die verwendete Einspannvorrichtung beeinflusst. Die Belastungsfolge besteht in beiden Normen aus zehn Gruppen mit jeweils zwei Impulsen in einem Abstand von 50 s bis 60 s, wobei die Prüflinge zwischen den Gruppen auf Umgebungstemperatur abgekühlt werden. Die Einspannvorrichtung hat einen erheblichen Einfluss auf die Temperatur der MO-Varistoren vor Beginn des zweiten Impulses einer Gruppe. Sie ist jedoch nur sehr schwer sinnvoll zu standardisieren. Da die Temperatur vor Beginn des zweiten Impulses das Energieaufnahmevermögen während des zweiten Energieeintrags beeinflusst, ist es zielführender, die Prüflinge nach jedem Energieeintrag auf Umgebungstemperatur abzukühlen. Da diese Maßnahme die Prüfdauer erhöht, wäre eine Anmerkung in der Norm sinnvoll, die klarstellt, dass eine Starttemperatur der Prüflinge über der Umgebungstemperatur bei dem zweiten Energieeintrag den kritischeren Fall darstellt. Diese Anmerkung ermöglichte in der Anwendung eine Verkürzung der Abkühlzeit. Insgesamt reduziert das vorgeschlagene Abkühlen der Prüflinge auf Umgebungstemperatur den Einfluss der Einspannvorrichtung und gestaltete das Prüfergebnis reproduzierbarer.

Weiterhin ist die Aussagekraft der Ausgangsmessung der genannten Prüfungen zu der repetierenden Belastbarkeit sowohl in [IEC-37/416/FDIS] als auch in [IEEEC62.11-2012] zu überprüfen. Aus den vorgestellten Untersuchungen wird deutlich, dass eine Änderung der Referenzspannung kein eindeutiges Indiz für mechanische Vorschädigung ist. Weiterhin ist bekannt, dass die thermische Stabilität unter Umständen von weiteren Faktoren abhängig ist. In den hier vorgestellten Untersuchungen konnte noch nicht abschließend geklärt werden, ob die nicht standardisierte Stückprüfung nach dem Herstellungsprozess die Änderung der Referenzspannung durch die geprüften Energieeinträge beeinflusst. Es ist zu vermuten, dass sich die *UI*-Kennlinie von MO-Varistoren, die einer Stückprüfung mit einem Energieeintrag hohen Stromscheitelwerts und hoher Stromsteilheit ausgesetzt waren, bei weiteren Energieeinträgen weniger stark verändert, als bei einer Stückprüfung,

die zu weniger Ladungsträgermigration führt. Somit ist es möglich, dass die Änderung der Referenzspannung von der verwendeten Stückprüfung abhängt, den Betrieb jedoch nur unwesentlich beeinflusst.

In der Ausgangsmessung des „Test to verify the repetitive charge transfer rating“ in [IEC-37/416/FDIS] ist die Prüfung bei einem Doppelexponentialstoßstrom der Form  $8/20\text{ }\mu\text{s}$  vorgesehen. Die vorgestellten Untersuchungen deuten darauf hin, dass mit diesem Energieeintrag nicht in allen Fällen Vorschädigungen von MO-Varistoren identifiziert werden können. Diese Belastung sollte durch die Prüfung des Einzelimpulsenergieaufnahmevermögens mit einem Energieeintrag, der als besonders kritisch angesehen wird, ergänzt werden, um die Aussagekraft der Prüfung zu erhöhen. Als besonders sensibel für Fehlstellen und Vorschädigungen im MO-Varistor scheint, nach den vorgestellten Untersuchungen, ein Wechselstromenergieeintrag mit einstelliger Stromdichte zu sein. Möglicherweise ist als Nachweis ein Energieeintrag nur bis zum Nennenergieaufnahmevermögen ausreichend, was die Belastungen der Prüfeinrichtung reduzieren würde. Weiterhin ist noch zu klären, wie stark die Stromdichte eingegrenzt werden müsste, und ob das Prüfequipment der Hersteller für den „Power-frequency voltage-versus-time test“ der [IEC-37/416/FDIS] für diese Untersuchung genutzt werden kann. Letzteres würde die Akzeptanz für einen solchen Test deutlich erhöhen.

Die Konditionierung der MO-Varistoren zu Beginn des „Switching surge energy rating test“ der [IEEE62.11-2012] mit 18 Rechteckimpulsen erscheint nicht zielführend, da diese die *UI*-Kennlinie im Vordurchbruchbereich nach den vorgestellten Untersuchungen nicht negativ beeinflusst. Aus diesem Grund erscheint es möglich, diese Konditionierung wie in der [IEC-37/416/FDIS] für Überspannungsableiter ohne Serienfunkenstrecke entfallen zu lassen.

Der Verlustleistungsverlauf des „Test to verify long term stability under continuous operating voltage“ nach [IEC-37/416/FDIS] und des „Accelerated aging test of varistors“ nach [IEEE62.11-2012] wird nach den vorgestellten Untersuchungen durch Veränderungen der *UI*-Kennlinie infolge der nicht standardisierten Stückprüfung beeinflusst. Da der Verlustleistungsverlauf bei den in den Normen verwendeten Temperaturen und üblichen Spannungen innerhalb der ersten Stunden beeinflusst wird, ist der bisherige Bezugswert für das Bestehenskriterium dieser Prüfung von der Stückprüfung beeinflusst. Der Bezugswert sollte in einen Zeitbereich der Alterungsprüfung gelegt werden, der durch die verwendete Stückprüfung unbeeinflusst ist. Die vorgestellten Untersuchungen lösen den Bereich der ersten 200 h der Alterungsprüfung nicht genau genug auf, um eine genauere Empfehlung geben zu können.

Sollte diese Empfehlung nicht umgesetzt werden, so sollte der Zeitpunkt des Bezugswertes in [IEEE62.11-2012] genauer als die bislang angegebene Zeitspanne „nach 2 h bis 5 h“ eingegrenzt werden. Aufgrund der unter Umständen starken Dynamik des Verlustleistungsverlaufes innerhalb der ersten Stunden, grenzt [IEC-37/416/FDIS] den Bezugswert auf  $\pm 15$  min um den Zeitpunkt bei 3 h ein. Dies sollte mit der heute zur Verfügung stehenden Messtechnik ohne weiteres zu realisieren sein und deshalb entsprechend in die [IEEE62.11-2012] übernommen werden.

Aufgrund der vorgestellten Untersuchungen zur Regeneration von Degradationen im MO-Varistor erscheint es sinnvoll, dass im „Thermal recovery test“ nach [IEC-37/416/FDIS] die maximale Vorheizzeit nach der Konditionierung eingegrenzt wird. Eine solche Vorgabe fehlt bislang völlig in [IEEE62.11-2012] und sollte ergänzt werden.

### 6.3 Ausblick

Durch die hier vorgestellten Untersuchungen konnten viele Fragen geklärt und Tendenzen aufgezeigt werden. An einigen wenigen Stellen konnten jedoch aufgrund der begrenzten Ressourcen einige Fragen nicht im Detail beantworten werden. Aus Sicht des Autors wäre es dementsprechend interessant, den nachfolgenden Fragestellungen mit vertiefenden Untersuchungen nachzugehen:

Die Temperaturabhängigkeit der *UI*-Kennlinie wurde in dieser Arbeit an zwei unterschiedlichen MO-Varistorkeramiken über einen eingeschränkten Temperatur- und Stromdichtebereich untersucht. Ungeklärt ist, von welchen Faktoren die Temperaturabhängigkeit im Durchbruchbereich abhängt. Interessant wäre, zu untersuchen, ob es einen Zusammenhang zwischen der Temperaturabhängigkeit der *UI*-Kennlinie und dem Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen verschiedener MO-Varistorkeramiken gibt.

Weiterhin ist bislang ungeklärt, welche Merkmale zu einem reduzierten Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen von einzelnen fabrikneuen MO-Varistoren eines Produktionsloses führen. Sobald dies eingegrenzt werden kann, wäre zu untersuchen, mit welchen Prüfverfahren bzw. Belastungsformen sich solche MO-Varistoren mit geringem Aufwand identifizieren lassen, gleichzeitig aber möglichst geringe Vorschädigungen in den übrigen MO-Varistoren hervorrufen. Dies könnte für die Stückprüfung von MO-Varistoren im Anschluss an den Herstellungsprozess von Bedeutung sein.

Für die Anwender von Überspannungsableitern ist hingegen das Erkennen von Vorschäden, idealerweise während des Betriebs, von Bedeutung. Durch die vorgestellten Untersuchungen

konnte gezeigt werden, dass signifikante Veränderungen der *UI*-Kennlinie kein eindeutiges Zeichen für praxisrelevante Vorschädigungen von MO-Varistoren sind. Es bleibt die Frage zu klären, durch welches kommerziell anwendbare Verfahren diese erkannt werden können.

In den bisherigen Untersuchungen wurden unterschiedliche Stromdichtebereiche mit unterschiedlichen Impulsformen untersucht. Die Fragestellung, bei welchem Verhältnis der Stromscheitelwerte das Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen eines Wechselstromenergieeintrags z. B. dem eines Gleichstromenergieeintrags entspricht, wäre noch zu untersuchen.

In diesem Zusammenhang ist auch noch die Frage der Polaritätseffekte von repetierenden Belastungen bislang nur unzureichend untersucht. Die hier vorgestellten Untersuchungen zu repetierenden Belastungen alternierender Polarität zeigen Unterschiede im Vorschädigungsverhalten. Diese Untersuchungen sollten in weitere Stromdichtebereiche und auf weitere Belastungsformen ausgedehnt werden. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse könnten auch für die Fragestellung hilfreich sein, ob eine bestimmte Polaritätsfolge in der Normung vorgeschrieben oder ausgeschlossen werden sollte.

Hieraus ergibt sich die Fragestellung der Wechselwirkung zwischen unterschiedlichen Belastungen. Es ist bislang noch nicht systematisch untersucht worden, ob es bestimmte Kombinationen energetischer Belastungen gibt, die zu einem besonders geringen Energieaufnahmevermögen von MO-Varistoren führen. Denkbar wäre, dass spezielle Vorbelastungen z. B. mechanische Vorschädigungen hervorrufen, die sich bei bestimmten Energieeinträgen besonders stark auswirken.

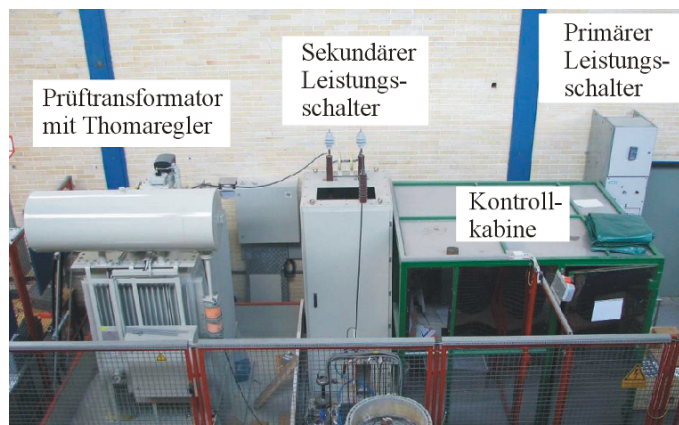
Es konnte auch gezeigt werden, dass unter Umständen Änderungen der *UI*-Kennlinie reversibel sind. Es bleibt zu prüfen, ob diese Art der Kennlinienänderung praktische Relevanz hat und ein Verfahren zur beschleunigten Rückbildung die Betriebssicherheit von Überspannungsableitern erhöhen könnte.

# A Zusatzinformationen zu den verwendeten Versuchsanlagen

In diesem Kapitel werden zusätzliche Informationen zu den Versuchsanlagen gegeben, die über die für das Verständnis der dargestellten Untersuchungen notwendigen Informationen hinausgehen. Zu diesem Zweck werden in den nachfolgenden Abschnitten die verwendeten Messmittel vorgestellt und ein vertiefender Einblick in die Versuchsanlagen gegeben.

## A.1 Wechselstromprüfsystem

Einen Überblick über die Versuchseinrichtung bietet *Abbildung A.1*. In dieser sind die primären und sekundären Leistungsschalter, der Prüftransformator sowie die Kontrollkabine<sup>153</sup> dargestellt. Der Leistungsteil des Prüfsystems inklusive Steuerung und Schutzeinrichtung wurde von der Firma HIGHVOLT installiert. Sie besteht zum Hauptteil aus dem Ein-Phasen-Thomaregler, dessen technische Daten in *Tabelle A.1* wiedergegeben sind.



**Abbildung A.1:** Gesamtdarstellung des Wechselstromprüfsystems [Rei08]

<sup>153</sup> Die Prüfaufnahme ist vom Betrachter aus vor dem sekundären Leistungsschalter angeordnet.

**Tabelle A.1:** Technische Daten des Ein-Phasen-Thomareglers in der für die Untersuchungen verwendeten Beschaltung

Bezeichnung	
Hersteller:	HTT (Hochspannungstechnik und Transformatorbau)
Bem. Leistung:	450 kVA
Bem. Frequenz:	50 Hz
Bem. Spannung:	0 kV bis 10 kV (stufenlos einstellbar)
Bem. Strom:	45 A

Das Prinzipschaltbild ist Abbildung 4.2 zu entnehmen. Die am Prüfling abfallende Spannung wird über einen ohmschen Spannungsteiler gemessen, der einen Oberspannungswiderstand von  $50\text{ M}\Omega$  und einen Unterspannungswiderstand von  $3,3\text{ k}\Omega$  besitzt<sup>154</sup>. Der durch den Prüfling fließende Strom wird je nach Stromscheitelwert des Energieeintrags über zwei unterschiedliche Stromwandler gemessen. Die technischen Daten der Stromwandler sind in *Tabelle A.2* bzw. *Tabelle A.3* angegeben. Um eine Potentialtrennung zwischen Prüfanordnung und PC-Messkarte zu erzielen, werden die gewandelte Spannung und der gewandelte Strom von einem Lichtwellenleiter-Übertragungssystem<sup>155</sup> (dessen technische Daten in *Tabelle A.4* dargestellt sind) übertragen. Die Messdaten werden von einer PC-Messkarte mit den in *Tabelle A.5* dargestellten technischen Daten erfasst und von einem LabVIEW-Programm ausgewertet und dokumentiert. In diesem Programm werden der Beginn und das Ende des Energieeintrags durch Auswertung des Strom- und Spannungsverlaufes detektiert und der Energieeintrag für diesen Zeitraum berechnet.

Der induktive Spannungsfall am Prüfling wird in diesem Prüfsystem nicht kompensiert, da die Stromsteilheit der Wechselstromenergieeinträge vergleichsweise gering ist. Ein Beispiel eines ungefilterten Spannungs- und Stromverlaufes bei Belastung eines metallischen Prüfkörpers<sup>156</sup> mit den geometrischen Dimensionen typischer MO-Varistoren der Hochspannungsebene ist in *Abbildung A.2* dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das Spannungssignal über die gesamte Versuchsdauer und insbesondere auch während des Stromflusses im gleichen Bereich liegt, weshalb keine Kompensation erforderlich ist.

<sup>154</sup> Das Übersetzungsverhältnis (inklusive LWL-Übertragung etc.) wurde durch Vergleichsmessung mit einem im verwendeten Spannungsbereich kalibrierten Messsystem auf 15779:1 festgelegt.

<sup>155</sup> Der Nullpunkt und die Verstärkung des Übertragungssystems sind justierbar.

<sup>156</sup> Es handelt sich um die für die Versuche in Kapitel 5.2.3 vorgestellte Einspannvorrichtung bei einer Temperatur im Prüfraum von etwa  $210^\circ\text{C}$ , da diese Prüfkammer den ungünstigsten Fall im Bezug auf ohmsche und induktive Spannungsfälle darstellt.



**Tabelle A.2:** Technische Daten des Halleffekt-Stromwandlers, der für Wechselstrom-energieeinträge mit Stromscheitelwerten  $< 15\text{ A}$  im Wechselstromprüfsystem verwendet wird

Bezeichnung	
Hersteller:	LEM (Liaisons Electroniques-Mécaniques)
Typ:	PCM 10-P
Strommessbereich:	0 A bis $\pm 20\text{ A}$
Genauigkeit:	$\pm 1\%$
Linearität (0 A bis $\pm 20\text{ A}$ ):	$\pm 0,2\%$
max. Temperaturdrift:	$\pm 0,03\text{ mA/K}$
Frequenzbereich ( $-3\text{ dB}$ ):	0 kHz bis 1 kHz
Umgebungstemperatur:	$-25\text{ °C}$ bis $55\text{ °C}$

**Tabelle A.3:** Technische Daten des Halleffekt-Stromwandlers, der für Wechselstrom-energieeinträge mit Stromscheitelwerten  $\geq 15\text{ A}$  im Wechselstromprüfsystem verwendet wird

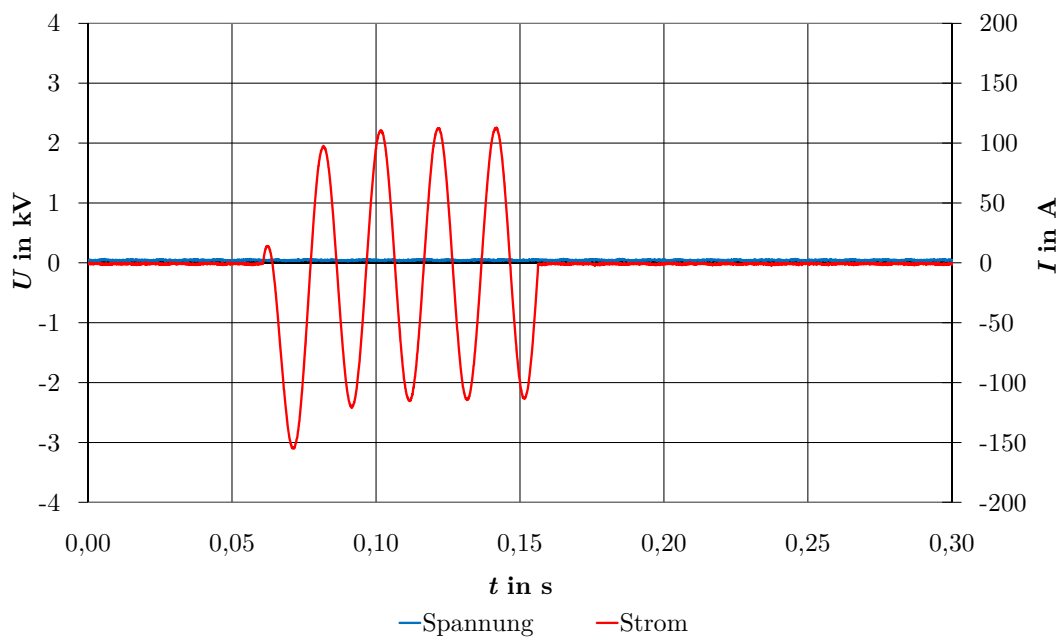
Bezeichnung	
Hersteller:	LEM (Liaisons Electroniques-Mécaniques)
Typ:	LF 1005-S
Strommessbereich:	0 A bis $\pm 1500\text{ A}$
Genauigkeit:	$\pm 0,4\%$
Linearität :	$< 0,1\%$
max. Temperaturdrift:	$\pm 0,5\text{ mA}$
Frequenzbereich ( $-1\text{ dB}$ ):	0 kHz bis 150 kHz
Umgebungstemperatur:	$-10\text{ °C}$ bis $85\text{ °C}$

**Tabelle A.4:** Technische Daten des Lichtwellenleiter-Übertragungssystems, das im Wechselstromprüfsystem eingesetzt wird

Bezeichnung	
Hersteller:	Nicolet Instrument Technologies
Typ:	ISOBE 3000
Frequenzbereich ( $-3\text{ dB}$ ):	0 MHz bis 15 MHz
Eingangsimpedanz:	$1\text{ M}\Omega$ , 30 pF
DC Nullpunktverschiebung:	$< 2,5\text{ mV/K}$
Genauigkeit der DC Verstärkung:	$\pm 3\%$ bei $23\text{ °C}$ ( $\pm 5\text{ °C}$ )

**Tabelle A.5:** Technische Daten der PC-Messkarte, die im Wechselstrom-, Referenzspannungs- und Alterungsprüfsystem verwendet wird

Bezeichnung	
Hersteller:	NI (National Instruments)
Typ:	PCI NI 6221
ADC Auflösung:	16 bit
max. Abtastrate:	250 kS/s
max. Eingangsspannung:	$\pm 10$ V
max. Ausgangsspannung:	$\pm 10$ V
max. Ausgangsstrom:	$\pm 5$ mA
Eingangsimpedanz:	$> 10$ G $\Omega$ , 100 pF
Ausgangswiderstand:	$\pm 0,2$ $\Omega$
absolute Genauigkeit (bei $U_{\max}$ ):	3,1 mV



**Abbildung A.2:** Oszillogramm von Spannung und Strom an einem metallischen Prüfkörper im Wechselstromprüfsystem

## A.2 Rechteckimpulsgenerator

In *Abbildung A.3* ist der Rechteckimpulsgenerator in einem sehr frühen Aufbaustadium mit zehn Stufen dargestellt. Der Generator wurde mit 20 Stufen für und während der Untersuchungen von [Rei08] ausgelegt und aufgebaut und für die in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen auf 34 Stufen erweitert. Die verwendete Ladeeinrichtung wird auch für den Doppelsexponentialstoßstromgenerator verwendet und im Laufe der Untersuchungen überarbeitet. Das Prinzipschaltbild des Generators ist *Abbildung 4.4* zu entnehmen. Jede Stufe besteht aus einem Kondensator mit einer Kapazität von  $10\text{ }\mu\text{F}$  mit einer Nennspannung von mindestens  $40\text{ kV}$  und einer Induktivität, deren technische Daten *Tabelle A.6* zu entnehmen sind. Durch Kombinationen der einzelnen Spulenabschnitte in den verschiedenen Stufen des Rechteckimpulsgenerators können Rechteckimpulse verschiedener Scheiteldauer erzeugt werden.



**Abbildung A.3:** Der Rechteckimpulsgenerator während des Aufbaus mit zehn Stufen

**Tabelle A.6:** Technische Daten der einzelnen Abschnitte einer Induktivität einer Stufe im Rechteckimpulsgenerator in *Abbildung A.3* (die Abschnitte der Induktivität werden von unten nach oben gezählt)

Spulenabschnitt	$L$	$R$
1 und 2	$300\text{ }\mu\text{H}$	$125\text{ m}\Omega$
3	$1430\text{ }\mu\text{H}$	$349\text{ m}\Omega$
4	$250\text{ }\mu\text{H}$	$107\text{ m}\Omega$
5	$500\text{ }\mu\text{H}$	$186\text{ m}\Omega$

Der durch den Prüfling fließende Strom wird, je nach erwartetem Stromscheitelwert, mit einem der in *Tabelle A.7* dargestellten Stromwandler gemessen. Zu der Messung der an dem Prüfling abfallenden Spannung wird der Universalspannungsteiler mit den in *Tabelle A.8* dargestellten technischen Daten verwendet. Die Messdaten werden von einem Oszilloskop, dessen technische Daten in *Tabelle A.9* darstellt sind, erfasst. Die vom Oszilloskop aufgezeichneten Daten werden von einem PC ausgelesen und von einem auf diesem ausgeführten LabVIEW-Programm ausgewertet und dokumentiert. Zum Schutz des Equipments, besonders bei den an diesem Generator ebenfalls erzeugten schnellen Doppelsexponentialstoßströmen der Form  $90/200\text{ }\mu\text{s}$ , wird eine Potentialtrennung zwischen Oszilloskop und PC verwendet.

Der Rechteckimpulsgenerator wird auch zur Erzeugung der Doppelimpulse (siehe Kapitel 5.3) bestehend aus zwei Rechteckimpulsen verwendet. Zu diesem Zweck wird der Rechteckimpulsgenerator auf zwei unabhängig voneinander auslösbare Generatoren aufgeteilt. Das Prinzipschaltbild dieser Anordnung<sup>157</sup> ist *Abbildung A.4* zu entnehmen. Um Fehlauflösungen der zweiten Generatorhälfte aufgrund von Spannungsschwankungen nach dem ersten Energieeintrag zu verhindern (ein Beispielennergieeintrag ist *Abbildung 5.22* zu entnehmen), wird nur der erste Energieeintrag mit einer Funkenstrecke, der zweite dagegen mit Hilfe eines Halbleiterschalters<sup>158</sup> ausgelöst.

Auch in diesem Prüfsystem wird der induktive Spannungsfall am Prüfling nicht kompensiert. In *Abbildung A.5* ist der ungefilterte Spannungs- und Stromverlauf bei Belastung eines metallischen Prüfkörpers<sup>159</sup> mit den geometrischen Dimensionen eines MO-Varistors der „Größe 1“ (wie er in der Hochspannungsebenen eingesetzt wird) dargestellt. Dieser Rechteckimpuls mit einer Scheiteldauer von etwa  $1,9\text{ ms}$  ist mit dem auf 34 Stufen erweiterten Rechteckimpulsgenerator erzeugt worden. Es ist zu erkennen, dass die Spannung vom Stromverlauf unbeeinflusst ist, weshalb keine Kompensation der Spannung erforderlich ist<sup>160</sup>.

---

<sup>157</sup> Zu dem Zeitpunkt, zu dem die Untersuchungen der Doppelimpulsbelastbarkeit durchgeführt wurden, bestand der Generator aus zwei mal zehn Stufen. Zum Zeitpunkt der Fertigstellung der vorliegenden Arbeit besteht er aus zwei mal siebzehn Stufen.

<sup>158</sup> Ein solcher Halbleiterschalter ist zur Zeit kommerziell nicht verfügbar und wurde für diese Anwendung von Herrn Dr.-Ing. Thomas Wietoska (Mitarbeiter des Fachgebiets Hochspannungstechnik der TU Darmstadt) entwickelt und aufgebaut.

<sup>159</sup> Es handelt sich um die für die Versuche in Kapitel 5.2.3 vorgestellte Einspannvorrichtung bei einer Temperatur im Prüfraum von etwa  $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ , da diese Prüfkammer einen ungünstigsten Fall im Bezug auf ohmsche und induktive Spannungsfälle darstellt.

<sup>160</sup> Die Verschiebung des Nullpunkts von Strom und Spannung am Ende des Energieeintrags hat für die Berechnung des Energieeintrags keine Relevanz.

**Tabelle A.7:** Technische Daten der drei im Rechteckimpulsgenerator je nach erwarteter Stromhöhe eingesetzten Rogowskistromwandler

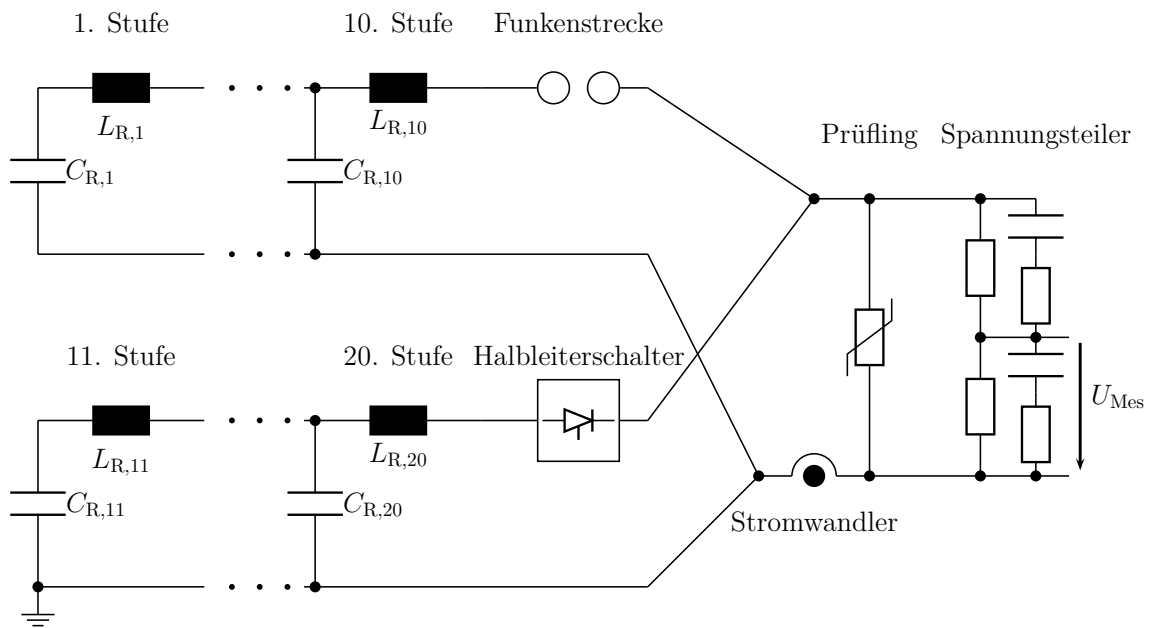
Bezeichnung			
Hersteller:	Power Electronic Measurements		
obere Grenzfrequenz:	16 MHz		
Genauigkeit:	$\pm 1\%$		
Typ:	CWT30	CWT150	CWT600
Max. Stromscheitelwert:	6 kA	30 kA	120 kA
Übertragungsfaktor:	1 mV/A	0,2 mV/A	0,05 mV/A
untere Grenzfrequenz:	0,9 Hz	0,3 Hz	0,1 Hz

**Tabelle A.8:** Technische Daten des Spannungsteilers, der für die Untersuchungen im Rechteckimpulsgenerator eingesetzt wird

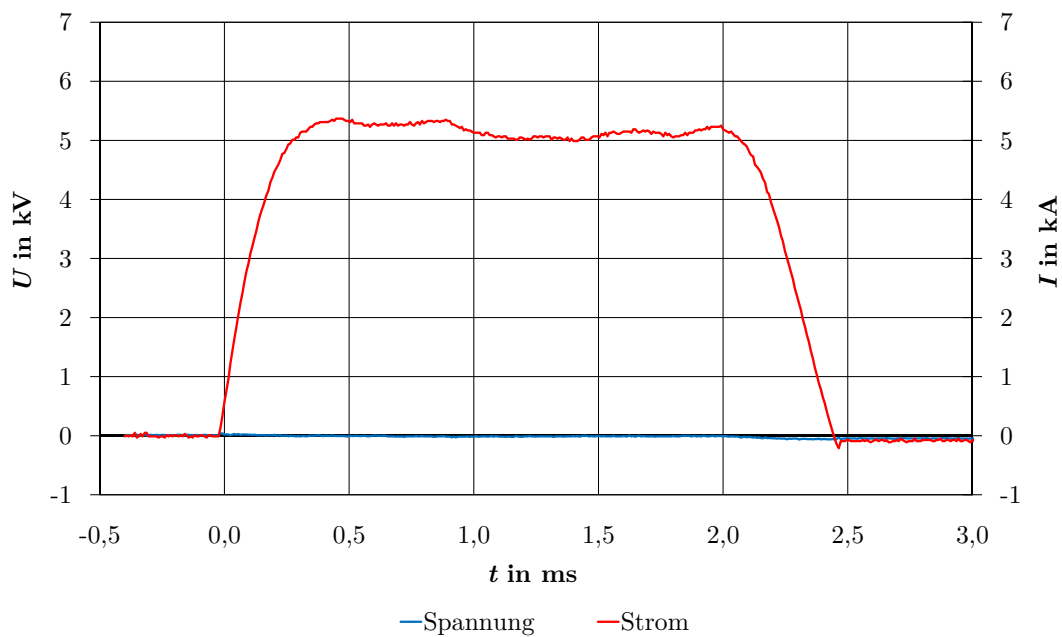
Bezeichnung	
Hersteller:	HILO-TEST
Typ:	HVT 40 RCR
max. Wechselspannung:	30 kV
max Stoßspannung:	100 kV
Übersetzungsverhältnis:	2500:1
Genauigkeit:	$\pm 1\%$
HV-Widerstand:	150 M $\Omega$
HV-Kapazität:	50 pF
Bandbreite:	20 MHz

**Tabelle A.9:** Technische Daten des Oszilloskops welches im Rechteckimpuls- und Doppel-exponentialstoßstromgenerator eingesetzt wird

Bezeichnung	
Hersteller:	Tektronix
Typ:	TDS3034
Bandbreite:	300 MHz
max. Abtastrate pro Kanal:	2,5 GS/s
max. Aufzeichnungslänge:	10000 Punkte
vertikale Auflösung:	9 bit
vertikale Genauigkeit:	$\pm 2\%$
max. Eingangsspannung:	150 V <sub>RMS</sub>
Eingangsimpedanz:	1 M $\Omega$ , 13 pF oder 50 $\Omega$



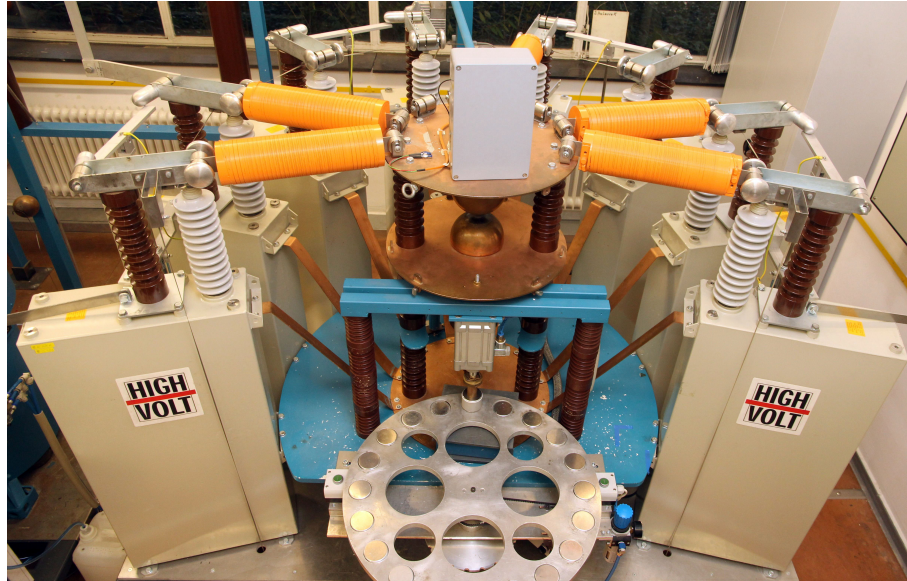
**Abbildung A.4:** Prinzipschaltbild des Rechteckimpulsgenerators zur Erzeugung von Doppelimpulsen.  $U_{Mes}$  ist die Spannung, die an das Oszilloskop übertragen wird.



**Abbildung A.5:** Oszillogramm von Spannung und Strom an einem metallischen Prüfkörper, belastet durch den Rechteckimpulsgenerator

### A.3 Doppel exponentialstoßstromgenerator

Der Doppel exponentialstoßstromgenerator, dessen Prinzipschaltbild Abbildung 4.7 entnommen werden kann, wurde mit Steuerung und Ladeeinrichtung (im Ursprungszustand) von der Firma HIGHVOLT installiert. Der Impulsgenerator (wie er in *Abbildung A.6* zu sehen ist) besteht aus bis zu acht parallelen Zweigen mit jeweils einem 2- $\mu\text{F}$ -Kondensator sowie einer Induktivitäts-Widerstandskombination<sup>161</sup>, deren Kennwerte *Tabelle A.10* zu entnehmen sind.



**Abbildung A.6:** Der Doppel exponentialstoßstromgenerator in der Konfiguration zur Prüfung der Restspannung mit einem Blitzstoßstrom der Form 8/20  $\mu\text{s}$

**Tabelle A.10:** Kennwerte der Induktivitäts-Widerstandskombination, die im Doppel exponentialstoßstromgenerator für die verschiedenen Stoßformen verwendet werden

Bezeichnung	Kurvenform	Anzahl	$L$	$R$
Steilstoßstrom	1/<20 $\mu\text{s}$	5	0,3 $\mu\text{H}$	10 $\Omega$
Hochstoßstrom	4/10 $\mu\text{s}$	8	1,44 $\mu\text{H}$	$\approx 0 \Omega$
Blitzstoßstrom	8/20 $\mu\text{s}$	5	32 $\mu\text{H}$	1,3 $\Omega$
Schaltstoßstrom	30/60 $\mu\text{s}$	2	380 $\mu\text{H}$	2,1 $\Omega$

Der durch den Prüfling fließende Strom wird je nach erwartetem Stromscheitelwert mit Hilfe des in *Tabelle A.11* oder des in *Tabelle A.12* dargestellten Stromwandlers und die Spannung

<sup>161</sup> Für die Hochstoßstrom-Energieeinträge werden nicht die Induktivitäts-Widerstandskombination aus [Rei08] verwendet, sondern neue ausgelegt und angefertigt, die einen schnelleren Umbau des Generators ermöglichen.

mit Hilfe des in *Tabelle A.13* dargestellten Spannungsteilers gemessen<sup>162</sup>. Die Messdaten werden von dem bereits erwähnten Oszilloskop (siehe *Tabelle A.9*) erfasst, mittels einer Funkverbindung (zum Schutz des Equipments) an einen PC übertragen und von einem LabVIEW-Programm ausgewertet und dokumentiert. Das Spannungsmaximum wird durch Bestimmung des über 4 % der Aufnahmedauer gemittelten Maximums ermittelt, wohingegen für das Strommaximum (wegen des höheren Gradientens) nur über 2 % gemittelt wird.

In diesem Prüfsystem muss der induktive Spannungsfall über dem MO-Varistor kompensiert werden. Das Verfahren zur Kompensation mit einer Induktivität im Messpfad, die vom Magnetfeld des Hauptstrompfades durchflossen wird, ist in [Rei08] ausführlich dokumentiert. Wie im Prinzipschaltbild in *Abbildung A.7* dargestellt, wird die durch das Magnetfeld des Hauptstrompfades induzierte Spannung  $U_{\text{IND}}$  durch die ebenfalls vom Magnetfeld des Hauptstrompfades induzierte Spannung in der Kompensationsspule (mit negativer Polarität)  $U_{\text{KOMP}}$  weitestgehend kompensiert. Die auf diese Weise erzielte Kompensation des induktiven Spannungsfalles ist unabhängig von der Stromstärke des Hauptstrompfades. Das ungefilterte Oszillogramm eines Spannungs- und Stromverlaufes bei Belastung eines metallischen Prüfkörpers<sup>163</sup> mit einem Hochstoßstrom der Form  $4/10 \mu\text{s}$  und einem Stromscheitelwert von etwa 100 kA im kompensierten Versuchskreis ist im Vergleich zum Spannungsverlauf eines äquivalent belasteten MO-Varistors *Abbildung A.8* zu entnehmen. Es ist zu erkennen, dass das kompensierte Spannungssignal nur noch einen sehr geringen induktiven Anteil enthält.

Nach [IEC60099-4] ist keine weitere Kompensation der Spannung notwendig, wenn der induktive Anteil der Spannung bei Belastung eines metallischen Prüfkörpers  $< 2 \%$  des Scheitelwertes der Spannung am zu prüfenden Objekt ist. Dieser Grenzwert wird auch hier angewandt, da der hierdurch erzeugte Messfehler kleiner ist als die Messunsicherheit des Gesamtsystems. Im vorliegenden Fall ist keine weitere Kompensation erforderlich, da bei Belastung von Prüflingen, die in Kapitel 5 verwendet werden, mit Hochstoßströmen der Form  $4/10 \mu\text{s}$ , bei Stromscheitelwerten im Bereich von 100 kA, der Scheitelwert der Spannung deutlich über 15 kV liegt.

---

<sup>162</sup> Um die Abweichungen des Messsystems zu überwachen, wird vor jeder Messreihe eine Restspannungsmessung an einem „Kalibrier-MO-Varistor“ (an einem weiteren MO-Varistor wird diese Messung jährlich durchgeführt) vorgenommen.

<sup>163</sup> Mit der gleichen geometrischen Dimension wie der eines MO-Varistors, der in der Hochspannungsebene eingesetzt wird.



**Tabelle A.11:** Technische Daten des Stromwandlers für Messungen mit Stromscheitelwerten  $< 120 \text{ kA}$  am Doppelexponentialstoßstromgenerator

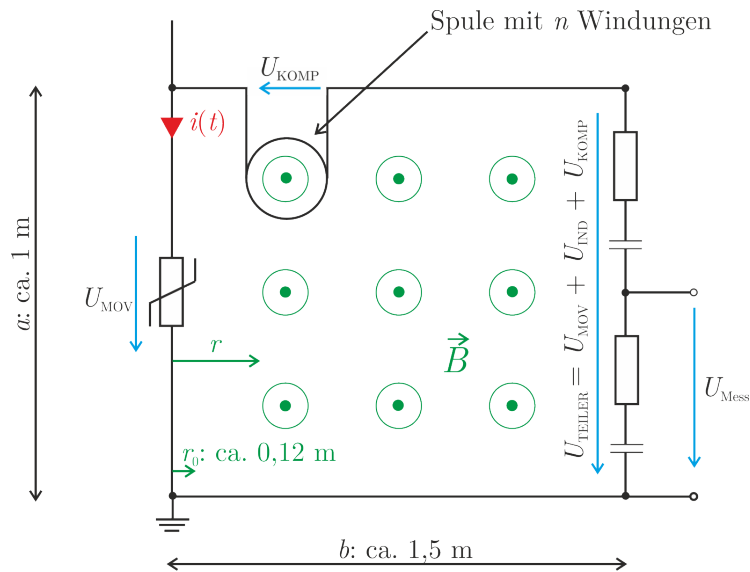
Bezeichnung	
Hersteller:	Stanges Industries
Typ:	3.5-0.005
Übertragungsfaktor:	0,005 V/A
Genauigkeit:	$\pm 0,02 \%$

**Tabelle A.12:** Technische Daten des eingesetzten Rogowskistromwandlers für Messungen mit Stromscheitelwerten  $\geq 120 \text{ kA}$  am Doppelexponentialstoßstromgenerator

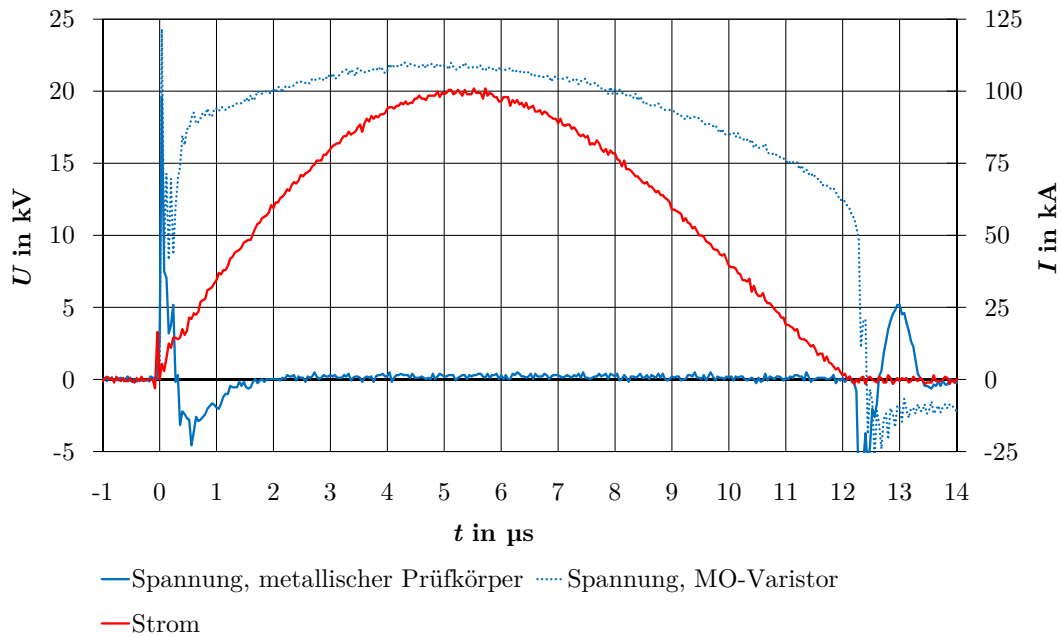
Bezeichnung	
Hersteller	PEM (Power Electronic Measurements)
Typ	CWT1500
max. Stromscheitelwert:	300 kA
Übertragungsfaktor:	0,02 mV/A
untere Grenzfrequenz:	0,03 Hz
obere Grenzfrequenz:	16 MHz
Genauigkeit:	$\pm 1 \%$

**Tabelle A.13:** Technische Daten des Spannungsteilers, der im Doppelexponentialstoßstromgenerator eingesetzt wird

Bezeichnung	
Hersteller:	Highvolt
Typ:	MCR 0,5/200-100/4C
Nennblitzstoßspannung:	200 kV
Maßstabsfaktor:	226
Messunsicherheit Spannung:	3 %
Messunsicherheit Zeit:	10 %



**Abbildung A.7:** Prinzipschaltbild zur Kompensation im Doppelsexponentialstoßstromgenerator (nach [Rei08]). Die durch das Magnetfeld des Hauptstrompfades induzierte Spannung  $U_{\text{IND}}$  wird durch die Spannung der Kompensationsspule (mit negativer Polarität)  $U_{\text{KOMP}}$  kompensiert.



**Abbildung A.8:** Oszillogramm von Spannung und Strom eines Hochstoßstromes der Form  $4/10 \mu\text{s}$  durch einen metallischen Prüfkörper, im Vergleich zu einem Spannungsverlauf bei äquivalenter Belastung eines MO-Varistors. Die Hochstoßströme werden von dem Doppelsexponentialstoßstromgenerator erzeugt.

## A.4 Referenzspannungsmesssystem

Das Referenzspannungsmesssystem, wie es in *Abbildung A.9* dargestellt ist, ist größtenteils<sup>164</sup> während der Untersuchungen von [Rei08] entstanden. Wie dem Prinzipschaltbild in *Abbildung 4.11* zu entnehmen ist, wird die Spannungsform von einer PC-Messkarte (deren technische Daten *Tabelle A.5* auflistet) erzeugt. Diese wird von einem Linearverstärker mit einer maximalen Ausgangsleistung von etwa 300 VA verstärkt und von einem Hochspannungstransformator hochtransformiert. Der durch den Prüfling fließende Strom wird mit Hilfe eines Stromshunts mit  $495\ \Omega$  und die an dem Prüfling abfallende Spannung mit Hilfe eines ohmschen Spannungsteilers<sup>165</sup>, der einen Überspannungswiderstand von  $50\ \text{M}\Omega$  und einen Unterspannungswiderstand von  $25\ \text{k}\Omega$  hat, gemessen. Die Messdaten werden von einer PC-Messkarte (deren technische Daten *Tabelle A.5* auflistet) erfasst und von einem LabVIEW-Programm ausgewertet und dokumentiert. Eine Kompensation des induktiven Spannungsfalls ist, wie aus den vorherigen Abschnitten hervorgeht, nicht erforderlich und wird dementsprechend auch nicht durchgeführt.



**Abbildung A.9:** Das Referenzspannungsmesssystem, das zur Prüfung der charakteristischen Spannung eingesetzt wird

<sup>164</sup> Zur Einspannung der Prüflinge wird im Gegensatz zu den Untersuchungen in [Rei08] eine pneumatische Einspannvorrichtung verwendet.

<sup>165</sup> Dessen Übersetzungsverhältnis wurde durch Vergleichsmessung mit einem in diesem Spannungsbereich kalibrierten Messsystem auf 1990:1 festgelegt.

## A.5 Alterungsprüfsystem

Das Alterungsprüfsystem wurde während der vorgestellten Untersuchungen entwickelt und installiert. Das Prinzipschaltbild gleicht dem des Referenzspannungsmesssystems mit dem Unterschied, dass bis zu 15 Prüflinge gleichzeitig geprüft werden können. Einen Gesamtüberblick über den Aufbau liefert *Abbildung A.10*. Für die Prüfungen stehen drei Temperaturschränke der Firma „Binder“, Typ „FED 115“, zur Verfügung, die von einem LabVIEW-Programm gesteuert werden. Zur Temperaturmessung wird ein LWL-Messsystem verwendet, die technischen Daten der Auswerteeinheit listet *Tabelle A.14* und die der verwendeten Temperatursensoren *Tabelle A.15* auf. Das von der Auswerteeinheit erzeugte Ausgangssignal wird von einer PC-Messkarte, deren technische Daten in *Tabelle A.5* dargestellt werden, erfasst.



**Abbildung A.10:** Gesamtansicht des Alterungsprüfsystems

Für die Spannungsbelastung wird die Spannungsform von der oben erwähnten PC-Messkarte erzeugt, von einem Leistungsverstärker (der Firma „the t.amp“, Typ „D3400“, mit einer maximalen Ausgangsleistung von 2 kW) verstärkt und von einem Hochspannungstransformator hochtransformiert. Der durch jeden einzelnen Prüfling fließende Strom wird jeweils mit Hilfe eines Shunts mit einem Widerstand von etwa 1 k $\Omega$  gemessen. Diese Shunts wurden außerhalb der Temperaturschränke installiert. Die an allen Prüflingen abfallende Spannung

**Tabelle A.14:** Technische Daten des Temperaturmesssystems, das im Alterungsprüfsystem verwendet wird

Bezeichnung	
Hersteller:	FISO Technologies
Typ:	TMI 4
Genauigkeit	0,025 % des Endwertes
Auflösung	0,01 % des Endwertes
Abtastrate:	20 Hz
Schaltzeit zwischen zwei Kanälen:	150 ms
Ausgangsspannung:	$\pm 5$ V

**Tabelle A.15:** Technische Daten des Temperatursensors, der im Alterungsprüfsystem verwendet wird

Bezeichnung	
Hersteller:	FISO Technologies
Typ:	FOT-L-SD
Messbereich:	$-40\text{ °C}$ bis $300\text{ °C}$
Genauigkeit:	$0,1\text{ °C}$
Auflösung:	$0,1\text{ °C}$
Antwortzeit:	$\leq 1,5\text{ s}$

wird mit Hilfe eines zentralen Spannungsteilers<sup>166</sup> mit einem Überspannungswiderstand von  $150\text{ M}\Omega$  und einem Unterspannungswiderstand von  $9,93\text{ k}\Omega$  gemessen. Die Messdaten werden von der oben erwähnten PC-Messkarte erfasst und von einem LabVIEW-Programm ausgewertet und dokumentiert. Die Hochspannungserzeugung, der Sicherheitskreis, der PC und das Temperaturmesssystem werden über eine unterbrechungsfreie Stromversorgung versorgt, die einen Weiterbetrieb bei Unterbrechung der Versorgungsspannung von  $< 1\text{ h}$  sicherstellt.

Wie in den vorangegangenen Abschnitten dargestellt, ist eine Kompensation des induktiven Spannungsfalls an den Prüflingen nicht erforderlich und wird dementsprechend nicht durchgeführt.

<sup>166</sup> Dessen Übersetzungsverhältnis wurde durch Vergleichsmessung mit einem in diesem Spannungsbereich kalibrierten Messsystem auf 15000:1 festgelegt.



## B Statistische Grundlagen

Dieses Kapitel<sup>167</sup> liefert einen Überblick über die mathematischen Grundlagen, die zur Auswertung der in Kapitel 5 beschriebenen Untersuchungen nötig sind. Es wird davon ausgegangen, dass der Leser mit den Grundbegriffen der Statistik vertraut ist. Aus diesem Grund werden in diesem Kapitel die Verteilungsfunktionen, die in ähnlich gelagerten Problemen verwendet werden, nur kurz beschrieben und anschließend auf die Schätzverfahren eingegangen, die zu den später berechneten mittleren Ausfallenergien benötigt werden. Abgeschlossen wird das Kapitel durch die Beschreibung der Berechnung der Konfidenzintervalle mit Hilfe der klassischen Schätzmethode, sowie der Maximum-Likelihood-Schätzung.

### B.1 Dichte- und Verteilungsfunktionen

(vgl. [Hau84] und [Har95])

Mit Hilfe von Dichtefunktionen lassen sich stetige Zufallsprozesse beschreiben. Die Dichtefunktionen können durch die Wahl von Dichtespezifischen Parametern (z. B. im Falle der Normalverteilung  $\mu$  und  $\sigma$ ) auf spezielle Problemstellungen angepasst werden. Unterschiedliche Verläufe lassen sich mit unterschiedlichen Dichtefunktionen nachbilden.

#### B.1.1 Normalverteilung

Die nach [Har95] am häufigsten verwendete Verteilung ist die Normalverteilung. Die Dichtefunktion lautet in Abhängigkeit des Erwartungswertes  $\mu$  und der Standardabweichung  $\sigma$ :

$$f_N(t) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{t-\mu}{\sigma} \right)^2} \quad (\text{B.1})$$

---

<sup>167</sup> Dieses Kapitel ist zu großen Teilen der Diplomarbeit des Autors entnommen.

Die Verteilungsfunktion lautet:

$$F_N(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^x e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} dt \quad (\text{B.2})$$

Die Normalverteilung ist symmetrisch zu ihrem Erwartungswert und wird in der Mathematik häufig verwendet, da es über den zentralen Grenzwertsatz möglich ist, die Summe einer endlichen Anzahl unabhängiger, normalverteilter Zufallsvariablen als normalverteilt anzunehmen.

Weiterhin ist die Normalverteilung in der Mathematik sehr weit entwickelt und es existiert eine große Zahl von robusten<sup>168</sup> Schätzern.

### B.1.2 Logarithmische Normalverteilung

Ist der Logarithmus einer Zufallsgröße normalverteilt, nennt man diese Zufallsgröße logarithmisch normalverteilt. Die logarithmische Normalverteilung ist eine kontinuierliche, rechtsschiefe Verteilung. Die Dichte der Verteilung ist:

$$f_1(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma t} \cdot e^{-\frac{(\ln(t)-\mu)^2}{2\sigma^2}} & t > 0 \\ 0 & t \leq 0 \end{cases} \quad (\text{B.3})$$

Die Verteilungsfunktion lautet:

$$F_1(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^x \frac{1}{t} e^{-\frac{(\ln(t)-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt \quad (\text{B.4})$$

### B.1.3 Doppelsexponentialverteilung

Die Doppelsexponentialverteilung ist eine symmetrische, stetige Funktion und hat die Form von zwei aneinandergesetzten Exponentialverteilungen. Sie wird häufig auch Laplaceverteilung (nach Pierre-Simon Laplace) genannt. Ihre Dichtefunktion ist definiert durch:

---

<sup>168</sup> Als robuste Schätzer werden Schätzer bezeichnet, die unempfindlich gegen Abweichungen von der Verteilung sind.



$$f_d(t) = \frac{1}{2\sigma} e^{-\frac{|t-\mu|}{\sigma}} \quad (\text{B.5})$$

mit  $t, \mu \in \mathbb{R}, \sigma \in \mathbb{R}^+$

Die Verteilungsfunktion hat die Form:

$$F_d(x) = \begin{cases} \frac{1}{2} e^{-\frac{\mu-x}{\sigma}} & x \leq \mu \\ 1 - \frac{1}{2} e^{-\frac{x-\mu}{\sigma}} & x > \mu \end{cases} \quad (\text{B.6})$$

### B.1.4 Weibullverteilung

Die Weibullverteilung ist weit verbreitet zur Beschreibung von Lebensdauer- und Qualitätsverteilungen. Die zweiparametrische Dichtefunktion ist definiert durch:

$$f_{w2}(t) = \alpha\beta \cdot t^{\beta-1} \cdot e^{-\alpha t^\beta} \quad (\text{B.7})$$

mit  $\alpha > 0, \beta > 0$  und  $t > 0$ .

Entsprechend ist die zweiparametrische Verteilungsfunktion gegeben durch:

$$F_{w2}(t) = 1 - e^{-\alpha t^\beta} \quad (\text{B.8})$$

mit  $\alpha > 0, \beta > 0$  und  $t > 0$ .

Es ist zu erkennen, dass für bekannte  $\alpha$  und  $\beta$  die Verteilungsfunktion der zweiparametrischen Weibullverteilung leichter zu berechnen ist als beispielsweise für die Normalverteilung.

Ein Sonderfall der Weibullverteilung ist die Exponentialverteilung. Diese ergibt sich aus *Gleichung B.7* und *Gleichung B.8* für  $\beta = 1$ .

Neben der zweiparametrischen Weibullverteilung wird auch die dreiparametrische verwendet. Diese unterscheidet sich von ersterer dadurch, dass die Verteilungsfunktion einen definierten Anfangspunkt  $t_0$  besitzt. Dabei bezeichnet  $t_0$  einen Wert unter dem das Merkmal (z. B. ein Überschlag) nicht auftreten kann.

Die dreiparametrische Dichtefunktion lautet:

$$f_{w3}(t) = \begin{cases} \alpha\beta \cdot (t - t_0)^{\beta-1} \cdot e^{-\alpha(t-t_0)^\beta} & t > t_0 \\ 0 & t \leq t_0 \end{cases} \quad (\text{B.9})$$

mit  $\alpha > 0$ ,  $\beta > 0$  und  $t > 0$ .

Die Verteilungsfunktion ist definiert durch:

$$F_{w3}(t) = \begin{cases} 1 - e^{-\alpha(t-t_0)^\beta} & t > t_0 \\ 0 & t \leq t_0 \end{cases} \quad (\text{B.10})$$

mit  $\alpha > 0$ ,  $\beta > 0$  und  $t > 0$ .

## B.2 Maximum-Likelihood-Schätzer

(vgl. [Fin02] und [Car90])

Der Maximum-Likelihood-Schätzer wird verwendet, um anhand einer Stichprobe für eine bekannte (oder angenommene) Verteilung die unbekannten Parameter der Verteilung (für die Normalverteilung  $\mu$  und  $\sigma$ ) zu schätzen. Die Bedeutung dieser Methode wächst nach [Car90] mit der Verbreitung der Personal Computer, da diese Methode zum Teil sehr rechenaufwendig ist. In diesem Kapitel werden die Grundideen und Gleichungen vorgestellt.

Die Grundidee der Maximum-Likelihood-Methode besteht darin, aus gesammelten Messwerten eine Funktion zu generieren, anhand derer das wahrscheinlichste Wertepaar von Erwartungswert und Standardabweichung der Verteilung bestimmt werden kann. Dementsprechend sind  $\theta_1$  und  $\theta_2$  des Maximums der Maximum-Likelihood-Funktion mit hoher Wahrscheinlichkeit der Erwartungswert und die Standardabweichung der Grundverteilung der untersuchten Stichprobe.

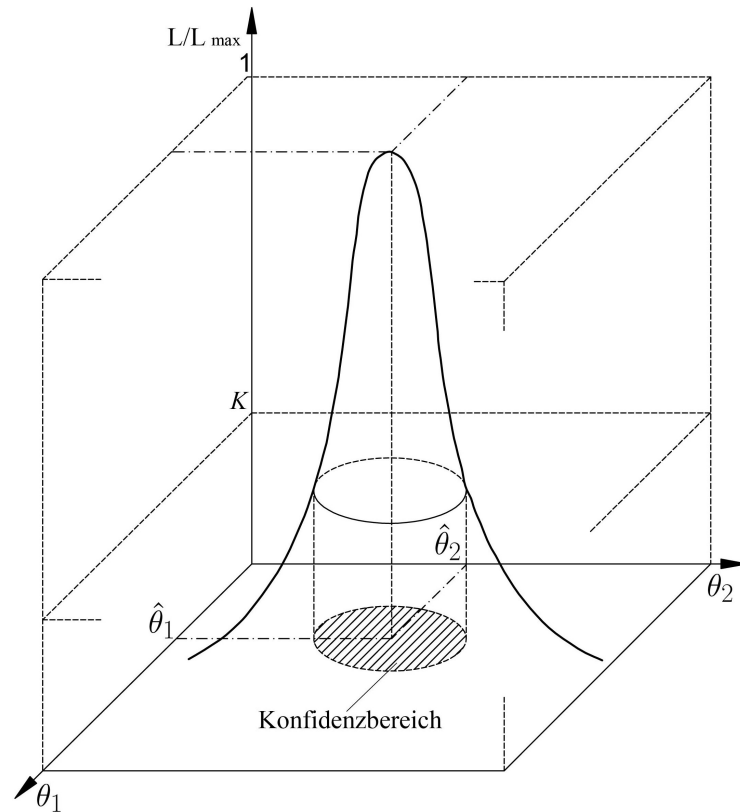
Die beschriebene Maximum-Likelihood-Funktion zu einer Dichtefunktion  $f_\theta(x)$  (beispielsweise eine aus Kapitel B.1) für eine Messreihe  $x_1, \dots, x_n$  lautet:

$$L(\theta_1, \theta_2, x_1, \dots, x_n) = f_\theta(x_1) \cdot \dots \cdot f_\theta(x_n) \quad (\text{B.11})$$

Das Maximum dieser Funktion erhält man durch Nullsetzen der ersten Ableitung der Maximum-Likelihood-Funktion, jeweils nach einer der gesuchten Parameter (die zweite Ableitung muss an der selben Stelle positiv sein).

Nach [Wil62] kann man mit der Maximum-Likelihood-Funktion nicht nur das wahrscheinlichste Wertepaar  $\hat{\theta}_1$  und  $\hat{\theta}_2$  berechnen, das aufgrund der Messwerte zur Verteilungsfunktion gehört, sondern auch Konfidenzbereiche angeben. In *Abbildung B.1* ist eine auf ihr Maximum

normierte Maximum-Likelihood-Funktion über Erwartungswert, sowie der Standardabweichung aufgetragen. Für alle  $L/L_{\max} \geq K(r; C)$  gilt, dass die zugehörigen Verteilungen innerhalb des Konfidenzbereiches  $C$  liegen. Anschaulich heißt das: Schneidet man den Graph in der Höhe  $K(r; C)$ , so liegt das Wertepaare  $\theta_1, \theta_2$  der gesuchten Verteilung mit einer Sicherheit  $C$  innerhalb der geschnittenen Fläche.



**Abbildung B.1:** Beispiel einer Maximum-Likelihood-Funktion normiert auf  $L_{\max}$  über  $\theta_1$  und  $\theta_2$ . (vgl. [Car90])

$K$  lässt sich mit Hilfe der  $\chi^2$  Verteilung berechnen, die wichtigsten Werte für den Freiheitsgrad  $r$  (Anzahl der unbekannten Parametern) und den Konfidenzbereich  $C$  sind *Tabelle B.1* zu entnehmen.

**Tabelle B.1:** Konstante  $K$  für Punktschätzungen. [Car90]

Freiheitsgrad $r$	$K$ Werte für Konfidenzbereiche		
	$C = 0,90$	$C = 0,95$	$C = 0,99$
1	0,258	0,147	0,0363
2	0,100	0,050	0,010
3	0,044	0,020	0,0034

Wird beispielsweise die Kombinationen aus  $\theta_1$  und  $\theta_2$  gesucht, die mit einer Sicherheit von 95 % zur gesuchten Verteilung gehört, so wird die Maximum-Likelihood-Funktion in der Höhe  $K(2; 0,95) = 0,05$  geschnitten. Die gesuchten Parameter sind alle innerhalb der geschnittenen Fläche liegenden  $\theta_1$  und  $\theta_2$ .

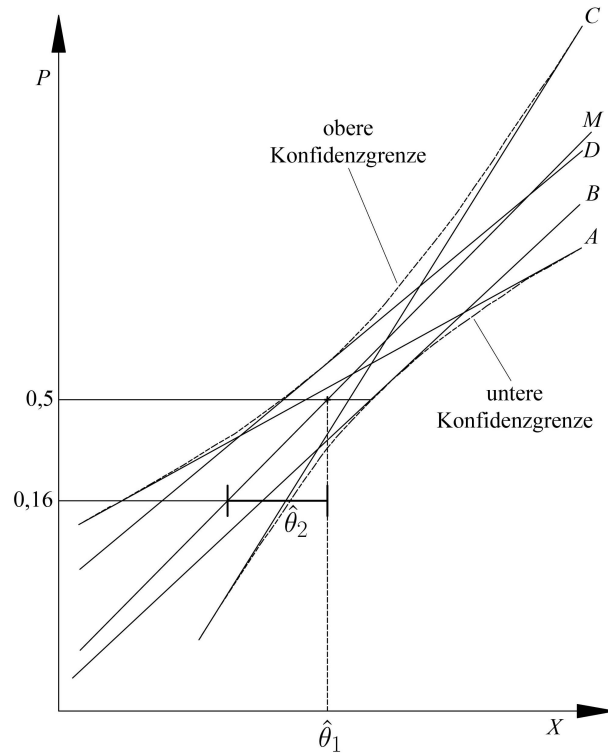
Aus den gesammelten Punkten  $\theta_1$  und  $\theta_2$  lassen sich auch Konfidenzgrenzen in ein Wahrscheinlichkeitspapier zeichnen. In *Abbildung B.2* wird gezeigt, wie man den Konfidenzbereich einer Verteilungsfunktion in einen Verteilungsgraphen aus den Extremwerten aus *Abbildung B.3* einzeichnen kann. Die Verteilungsfunktion  $M$  ist die Punktschätzung mit  $\hat{\theta}_1$  und  $\hat{\theta}_2$ . Die gestrichelten Linien geben die untere sowie die obere Grenze des Konfidenzbereiches der Verteilung an. Die Verteilungen  $A$ – $D$  sind die Verteilungsfunktionen, die sich aus den Extremwerten  $A$ – $D$  (*Abbildung B.3*) ergeben.

Für die statistischen Auswertungen der in Kapitel 5.1 vorgestellten Untersuchungen müssen aufgrund der Durchführung der Messungen zwei unterschiedliche Herangehensweisen unterschieden werden. Zum einen die „Progressive Stress Method“ (PSM) und zum anderen die „Multiple Level Method“ (MLM). mit der PSM werden die Untersuchungen auszuwertet, bei denen jeder Prüfling bis zum Ereigniseintritt (mechanischer Ausfall des Prüflings) getestet wird. Die MLM wird bei der Auswertung der Untersuchungen angewendet, bei denen Gruppen von Prüflingen dem gleichen Stress ausgesetzt werden und beobachtet wird, wie hoch die Ausfallquote der Gruppen ist.

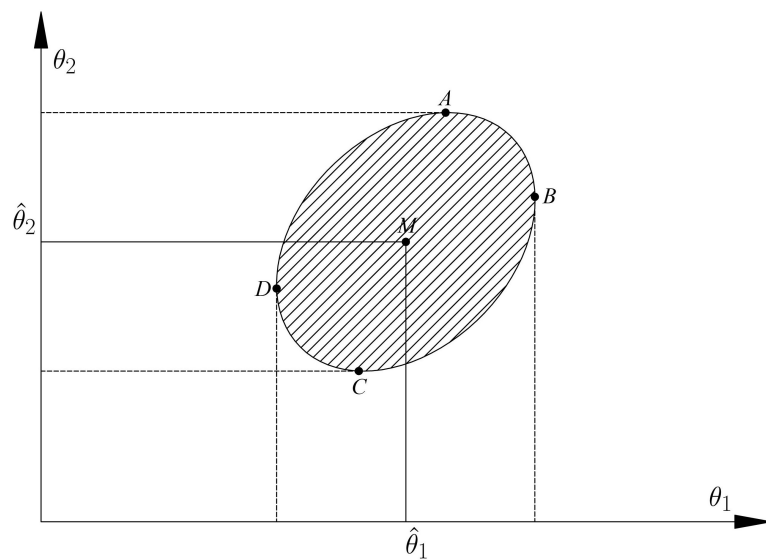
Für die in Kapitel 5.1 durchgeführten Untersuchungen ist der Unterschied zwischen den unterschiedlichen Verteilungsfunktionen sehr gering. Dies liegt vor allem an den geringen untersuchten Stückzahlen. [Rin97] hat in seinen Untersuchungen des Energieaufnahmevermögens von MO-Varistoren ebenfalls festgestellt, dass der Unterschied zwischen den verschiedenen Verteilungen (er verwendete die Normal-, Gumbel- und die Weibullverteilung) nur sehr gering ist und sich der Einfachheit halber für die Normalverteilung entschieden. In dieser Arbeit wird eine vergleichbare Anzahl von Prüflingen verwendet und ebenfalls die Normalverteilung zur Auswertung der Einzelimpulsbelastbarkeit gewählt. Aus diesem Grund wird im Folgenden der Maximum-Likelihood-Schätzer für eine Normalverteilung vorgestellt.

### B.3 Multiple Level Method

Für MLM ist nach [Car90] die Ausfallwahrscheinlichkeit durch eine Binominalverteilung zu beschreiben. Die Maximum-Likelihood-Funktion für  $n$  Klassen von Prüflingen, wobei eine



**Abbildung B.2:** Konfidenzbereich einer Verteilungsfunktion. Die Verteilungen  $A$ – $D$  bezeichnen die Verteilungen zu den Extremstellen in Abbildung B.3. Die Verteilungsfunktion  $M$  ist die wahrscheinlichste Verteilung mit dem Erwartungswert  $\hat{\theta}_1$  und der Standardabweichung  $\hat{\theta}_2$ . (vgl. [Car90])



**Abbildung B.3:** Beispiel eines Konfidenzbereiches mit den Extremstellen  $A$ – $D$ .  $\hat{\theta}_1$  und  $\hat{\theta}_2$  bezeichnet die wahrscheinlichste Kombination des Erwartungswertes und der Standardabweichung. (vgl. [Car90])

Klasse  $j$  einem Stress  $E_j$  ausgesetzt wurde,  $m_j$  Prüflinge umfasste von denen  $k_j$  ausfielen und somit  $w_j = m_j - k_j$  dem Stress  $E_j$  standhielten, lautet:

$$L_{\text{MLM}}(\theta_1, \theta_2) = \prod_{j=1}^n \binom{m_j}{k_j} (F_N(E_j))^{k_j} \cdot (1 - F_N(E_j))^{w_j} \quad (\text{B.12})$$

Der Vorfaktor der Binominalverteilung  $\binom{m_j}{k_j}$  kann hier gestrichen werden, da er durch die spätere Normierung auf den Maximalwert der Maximum-Likelihood-Funktion wegfällt. Die Maximum-Likelihood-Funktion lautet dann:

$$L_{\text{MLM}}(\theta_1, \theta_2) = \prod_{j=1}^n (F_N(E_j))^{k_j} \cdot (1 - F_N(E_j))^{w_j} \quad (\text{B.13})$$

Die Versuchsreihen im Kapitel 5.1, bei denen das komplexe Fehlerkriterium angewendet wird, werden mit Hilfe der Software MLM 6.1 der Firma HIGHVOLT ausgewertet. Ein Beispiel einer solchen Auswertung ist *Abbildung B.4* zu entnehmen. In der ausgewählten Messreihe wurden fünf Gruppen von Prüflingen, bestehend aus fünf bzw. zehn MO-Varistoren, mit jeweils einem anderen Energieniveau belastet. Die Ausfallrate innerhalb jeder Gruppe sowie deren Energieniveau (bezogen auf das Varistorvolumen) sind im Diagramm mittels der „Energienstufen“ dargestellt. Aus diesen Daten werden mittels der Punktschätzung die wahrscheinlichste Verteilungsfunktion, sowie die Konfidenzintervalle ermittelt, die ebenfalls der Darstellung zu entnehmen sind. Zur weiteren Auswertung innerhalb des Kapitel 5 wird stets die Punktschätzung verwendet.

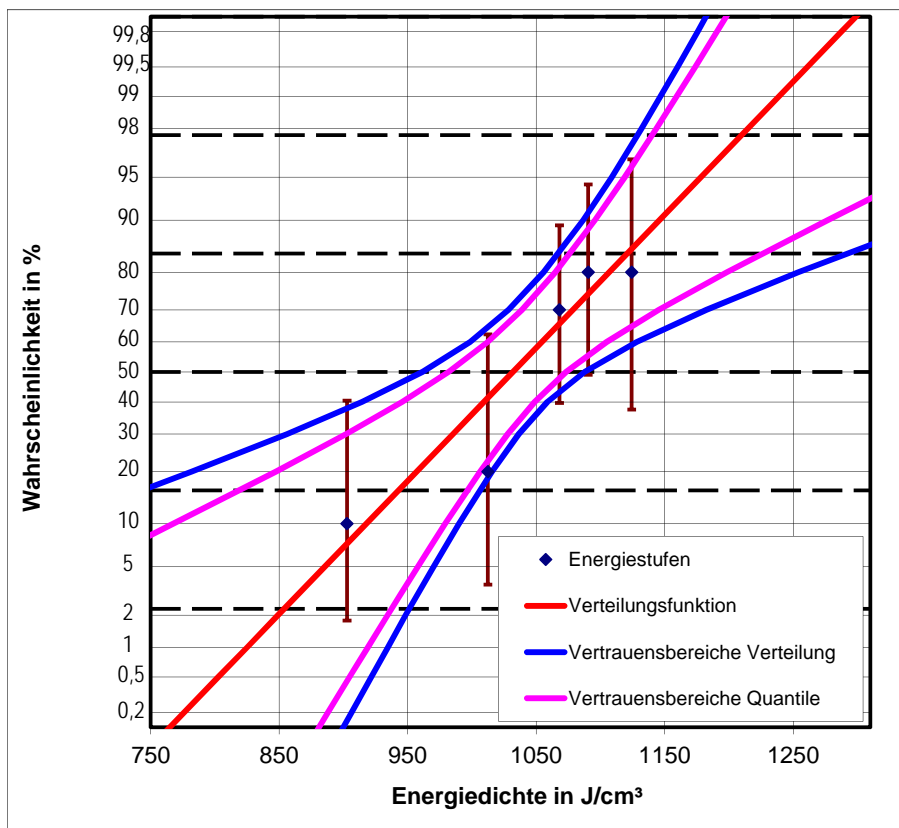
## B.4 Progressive Stress Method

Die Maximum-Likelihood-Funktion für PSM lautet für  $n$  getestete Prüflinge die jeweils einem Energieeintrag  $E_i$  standhalten, von denen  $m < n$  einem Energieeintrag größer als  $E_i$  standhalten (während der Versuche nicht ausfallen):

$$L_{\text{PSM}}(\theta_1, \theta_2) = \prod_{j=1}^{n-m} f_N(E_j) \cdot \prod_{i=1}^m (1 - f_N(E_i)) \quad (\text{B.14})$$

## Auswertung als Normalverteilung

Maximum-Likelihood-Schätzung:			
	Punktschätzung:	Konfidenzschätzung (eps=95%)	
		untere Grenze	obere Grenze
Mittelwert:	1031,975	981,849	1073,433
Standardabweichung:	88,993	54,456	190,072
1% Quantil:	824,946	573,436	918,955
Likelihood-Quotient:	0,480639		



**Abbildung B.4:** Beispiel einer Auswertung einer Messreihe aus Kapitel 5.1 mit der Software MLM 6.1 der Firma HIGHVOLT.

Da in dieser Arbeit alle Messreihen die mit PSM ausgewertet werden während des Energieeintrages ausfallen, kann die Gleichung wie folgt vereinfacht werden:

$$L_{\text{PSM}}(\theta_1, \theta_2) = \prod_{i=1}^n f_N(E_i) \quad (\text{B.15})$$

Das Maximum dieser Funktion für den Erwartungswert ergibt das Arithmetische Mittel von  $x_1, \dots, x_n$ :

$$\hat{\theta}_1(x_1, \dots, x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_n \quad (\text{B.16})$$

Für die Standardabweichung ergibt sich:

$$\hat{\theta}_2(x_1, \dots, x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{\theta}_1)^2 \quad (\text{B.17})$$

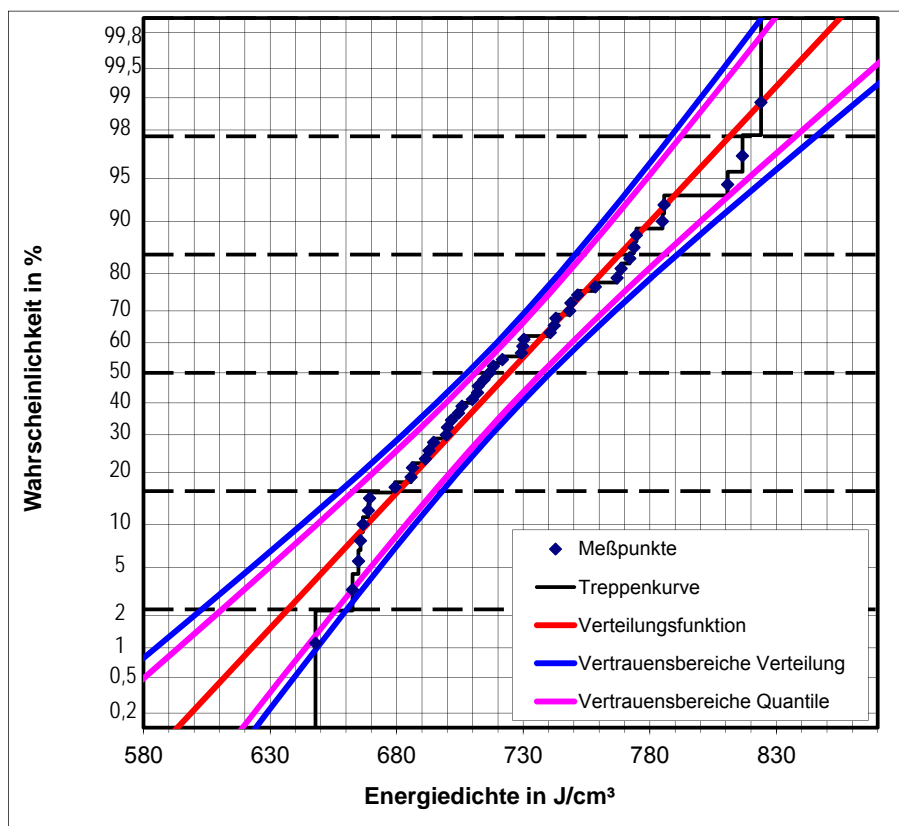
Hier hat der Maximum-Likelihood-Schätzer nur den Vorteil gegenüber einer klassischen Schätzung, dass man mit Hilfe der Maximum-Likelihood-Funktion auch Konfidenzbereiche angeben kann.

Die Messreihen in Kapitel 5.1, die bis zum mechanischen Ausfall des Prüflings während des Energieeintrages durchgeführt wurden, werden mit der Software PSM 6.1 der Firma HIGHVOLT ausgewertet. Ein Beispiel einer solchen Auswertung ist *Abbildung B.5* zu entnehmen. Jeder Messpunkt beschreibt die Ausfallenergie eines belasteten Prüflings bezogen auf das MO-Varistorvolumen. Diese Messpunkte werden größensortiert in das Wahrscheinlichkeitspapier eingetragen. Aus den Ausfallenergiedichten wird der Erwartungswert (Arithmetisches Mittel der Messpunkte) sowie die Standardabweichung bestimmt, die für die weiteren Auswertungen verwendet werden.



## Auswertung als Normalverteilung

Maximum-Likelihood-Schätzung:			
	Punktschätzung:	Konfidenzschätzung (eps=95%)	
		untere Grenze	obere Grenze
Mittelwert:	724,295	711,273	737,318
Standardabweichung:	43,633	35,965	54,471
1% Quantil	622,789	593,758	644,047
<hr/>			
Kolmogorov-Test:	Testgröße: 0,0885	kritischer Wert: 0,2024	=> zulässig



**Abbildung B.5:** Beispiel einer Auswertung einer Messreihe aus Kapitel 5.1 mit der Software PSM 6.1 der Firma HIGHVOLT.



# Literaturverzeichnis

- [ABB11] ABB SWITZERLAND LTD. *Overvoltage protection, Metal oxide surge arresters in medium voltage systems – Application guidelines*. Fünfte Auflage, 2011
- [Aso88] ASOKAN, T.; NAGABHUSHANA, G. R. und IYENGAR, G. *Improvement of non-linear characteristics of multicomponent ZnO-based ceramics containing Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>*. In: IEEE Transactions on Electrical Insulation, Band 23(2): S. 279–286, 1988. ISSN 0018-9367
- [Bar96a] BARTKOWIAK, M.; COMBER, M. und MAHAN, G. *Energy handling capability of ZnO varistors*. In: Journal of Applied Physics, Band 79(11): S. 8629–8633, 1996
- [Bar96b] BARTKOWIAK, M.; MAHAN, G.; MODINE, F. und ALIM, M. *Influence of ohmic grain boundaries in ZnO varistors*. In: Journal of Applied Physics, Band 79(1): S. 273–281, 1996. ISSN 0021-8979
- [Bar99] BARTKOWIAK, M.; COMBER, M. und MAHAN, G. *Failure modes and energy absorption capability of ZnO varistors*. In: IEEE Transactions on Power Delivery, Band 14(1): S. 152–162, 1999. ISSN 0885-8977
- [Bar01] BARTKOWIAK, M.; COMBER, M. und MAHAN, G. D. *Influence of nonuniformity of ZnO varistors on their energy absorption capability*. In: IEEE Transactions on Power Delivery, Band 16(4): S. 591–598, 2001. ISSN 0885-8977
- [Bla86] BLATTER, G. und GREUTER, F. *Electrical breakdown at semiconductor grain boundaries*. In: Phys. Rev. B, Band 34: S. 8555–8572, Dezember 1986
- [Bog00] BOGGS, S.; KUANG, J.; ANDOH, I. und NISHIWAKI, S. *Increased energy absorption in ZnO arrester elements through control of electrode edge margin*. In: IEEE Transactions on Power Delivery, Band 15(2): S. 562–568, 2000. ISSN 0885-8977
- [Car82] CARLSON, W. G. und GUPTA, T. K. *Improved varistor nonlinearity via donor impurity doping*. In: Journal of Applied Physics, Band 53(8): S. 5746–5753, 1982

- [Car90] CARRARA, G. und HAUSCHILD, W. *Statistical evaluation of dielectric test results*. Cigré, Electra, 1990
- [Cig10] CIGRÉ ARBEITSGRUPPE C4.301, TECHNISCHE BROSCHÜRE 440. *Use of Surge Arresters for Lightning Protection of Transmission Lines*. Cigré, 2010
- [Cig13a] CIGRÉ ARBEITSGRUPPE A3.17, TECHNISCHE BROSCHÜRE 544. *MO Surge Arresters – Stresses and Test Procedures*. Cigré, 2013
- [Cig13b] CIGRÉ ARBEITSGRUPPE C4.407, TECHNISCHE BROSCHÜRE 549. *Lightning Parameters for Engineering Applications*. Cigré, 2013
- [Cla99] CLARKE, D. R. *Varistor Ceramics*. In: Journal of the American Ceramic Society, Band 82(3): S. 485–502, 1999. ISSN 1551-2916
- [Dar94] DARVENIZA, M.; ROBY, D. und TUMMA, L. R. *Laboratory and analytical studies of the effects of multipulse lightning current on metal oxide arresters*. In: IEEE Transactions on Power Delivery, Band 9(2): S. 764–771, 1994. ISSN 0885-8977
- [Dar97] DARVENIZA, M.; TUMMA, L. R.; RICHTER, B. und ROBY, D. A. *Multipulse lightning currents and metal-oxide arresters*. In: IEEE Transactions on Power Delivery, Band 12(3): S. 1168–1175, 1997. ISSN 0885-8977
- [Dar98] DARVENIZA, M. und SAHA, T. *Surface flashovers on metal-oxide varistor blocks*. In: IEEE 6th International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, S. 406–409. 1998
- [Dar00] DARVENIZA, M.; SAHA, T. und WRIGHT, S. *Comparisons of in-service and laboratory failure modes of metal-oxide distribution surge arresters*. In: IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Band 3, S. 2093–2100. 2000
- [Den98] DENGLER, K. *Impulsalterung von Metalloxidableitern und ihre Überwachung im Betrieb*. Dissertation, Universität Stuttgart, 1998
- [Eda84] EDA, K. *Destruction mechanism of ZnO varistors due to high currents*. In: Journal of Applied Physics, Band 56(10): S. 2948–2955, 1984. ISSN 0021-8979
- [Eda88] EDA, K. *Progress in Fabrication Technology of Zinc Oxide Varistors*. In: Advances in Varistor Technology. Tagungsbericht der 2. internationalen Varistorkonferenz, S. 10–21. 1988

- [Eda89] EDA, K. *Zinc oxide varistors*. In: IEEE Electrical Insulation Magazine, Band 5(6): S. 28–30, 1989. ISSN 0883-7554
- [Ein79] EINZINGER, R. *Grain junction properties of ZnO varistors*. In: Applications of Surface Science, Band 3(3): S. 390–408, 1979. ISSN 0378-5963
- [Ein82] EINZINGER, R. *Nichtlineare elektrische Leitfähigkeit von dotierter Zinkoxid-Keramik*. Dissertation, Technische Universität München, 1982
- [FH03] FERNANDEZ-HEVIA, D.; DE FRUTOS, J.; CABALLERO, A. C. und FERNANDEZ, J. *Bulk-grain resistivity and positive temperature coefficient of ZnO-based varistors*. In: Applied Physics Letters, Band 82(2): S. 212–214, 2003. ISSN 0003-6951
- [FI08] FRIGURA-ILIASA, M. und TAMAS, A. *A Few Aspects about the Manufacturing Process of Five and Two Additives Metal Oxides Varistors*. In: Chemical Bulletin of „POLITEHNICA“ University of Timisoara, Band 53(67): S. 282–285, 2008
- [Fin02] VON FINCKENSTEIN, K. G. F.; LEHN, J.; SCHELLHAAS, H. und WEGMANN, H. *Arbeitsbuch Mathematik für Ingenieure, Band II Differentialgleichungen, Funktionentheorie, Numerik und Statistik*. Teubner Verlag, erste Auflage, August 2002
- [Fuj82] FUJIWARA, Y.; SHIBUYA, Y.; IMATAKI, M. und NITTA, T. *Evaluation of Surge Degradation of Metal Oxide Surge Arrester*. In: IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Band PAS-101(4): S. 978–985, 1982. ISSN 0018-9510
- [Gre86] GREUTER, F.; BLATTER, G.; ROSSINELLI, M. und SCHMÜCKLE, F. *Bulk and Grain Boundary Defects in Polycrystalline ZnO*. In: Materials Science Forum, Band 10-12: S. 235–240, 1986
- [Gre88] GREUTER, F.; BLATTER, G.; ROSSINELLI, M. und STUCKI, F. *Conduction mechanism in ZnO-varistors: an overview*. In: *Advances in Varistor Technology. Tagungsbericht der 2. internationalen Varistorkonferenz*, S. 31–53. 1988
- [Gre90] GREUTER, F. und BLATTER, G. *Electrical properties of grain boundaries in polycrystalline compound semiconductors*. In: Semiconductor Science and Technology, Band 5(2): S. 111, 1990
- [Gup90] GUPTA, T. K. *Application of Zinc Oxide Varistors*. In: Journal of the American Ceramic Society, Band 73(7): S. 1817–1840, 1990. ISSN 1551-2916

- [Had90] HADDAD, A.; FUENTES-ROSADO, J.; GERMAN, D. und WATERS, R. *Characterisation of ZnO surge arrester elements with direct and power frequency voltages*. In: IEE Proceedings, Band 137(5): S. 269–279, September 1990
- [Had04] HADDAD, A. und D.F., W., Hg. *Advances in High Voltage Engineering*. The Institution of Engineering and Technology, 2004
- [Had05] HADDAD, A.; WATERS, R.; GERMAN, D. M. und ABDUL-MALEK, Z. *Current disparity in multi-column surge arresters*. In: IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, Band 152(6): S. 945–951, 2005. ISSN 1350-2360
- [Har95] HARTUNG, J.; ELPELT, B. und KLÖSENER, K. *Statistik*. Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik. Oldenburg, München, 10. Auflage, 1995
- [Hau84] HAUSCHILD, W. und MOSCH, W. *Statistik für Elektrotechniker*. VEB Technik Berlin, erste Auflage, 1984
- [He07] HE, J. und HU, J. *Discussions on Nonuniformity of Energy Absorption Capabilities of ZnO Varistors*. In: IEEE Transactions on Power Delivery, Band 22(3): S. 1523–1532, 2007. ISSN 0885-8977
- [He11] HE, J.; LI, C.; HU, J. und ZENG, R. *Deep Suppression of Switching Overvoltages in AC UHV Systems Using Low Residual Arresters*. In: IEEE Transactions on Power Delivery, Band 26(4): S. 2718–2725, 2011. ISSN 0885-8977
- [Hei01] HEINRICH, C. und HINRICHSSEN, V. *Diagnostics and monitoring of metal-oxide surge arresters in high-voltage networkscomparison of existing and newly developed procedures*. In: IEEE Transactions on Power Delivery, Band 16(1): S. 138–143, 2001. ISSN 0885-8977
- [Hie74] HIEDA, S.; KOBAYASI, M.; FURUYA, N.; KONDO, N.; MITANI, K. und AIZAWA, T. *Gapless Arrester for Power Use*. In: Meiden Jiho, Band 119(6): S. 65–72, 1974. Dieses Paper ist in japanischer Sprache. In englischer Übersetzung ist es unter dem Titel „Gapless Lightning Arresters for Power Systems“ in Meiden review 46 (1975), Nr. 2, S. 17–24 veröffentlicht
- [Hin07] HINRICHSSEN, V.; REINHARD, M. und RICHTER, B. *Energy Handling Capability of High-Voltage Metal-Oxide Surge Arresters Part 1: A Critical Review of the Standards*. In: Cigré SCA3 International Technical Colloquium. 2007
- [Hin11] HINRICHSSEN, V. *Metalloxid-Ableiter in Hochspannungsnetzen*. Siemens AG, dritte Auflage, 2011

- [Hof13] HOFSTÄTTER, M.; NEVOSAD, A.; TEICHERT, C.; SUPANCIC, P. und DANZER, R. *Voltage polarity dependent current paths through polycrystalline ZnO varistors*. In: Journal of the European Ceramic Society, Band 33(15-16): S. 3473–3476, 2013. ISSN 0955-2219
- [Ish04] ISHII, M.; YOKOYAMA, S.; IMAI, Y. und HONGO, Y. *Lightning Protection of Pole-Mounted Transformer on Japanese MV Lines*. In: *Cigré Paris Session*. 2004
- [Kan83] KAN, M.; NISHIWAKI, S.; SATO, T.; KOJIMA, S. und YANABU, S. *Surge Discharge Capability and Thermal Stability of a Metal Oxide Surge Arrester*. In: IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Band 102(2): S. 282–289, 1983. ISSN 0018-9510
- [Kle04] KLEIN, T. *Einflüsse auf das Energieaufnahmevermögen von Metalloxidableitern*. Dissertation, Universität Stuttgart, Februar 2004
- [Lat83] LAT, M. V. *Thermal Properties of Metal Oxide Surge Arresters*. In: IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Band 102(7): S. 2194–2202, 1983. ISSN 0018-9510
- [Leh85] LEHN, J. und WEGMANN, H. *Einführung in die Statistik*. Teubner, Stuttgart, dritte Auflage, 1985. ISBN 3519020717
- [Lev76] LEVINSON, L. M. und PHILIPP, H. R. *High-frequency and high-current studies of metal oxide varistors*. In: Journal of Applied Physics, Band 47(7): S. 3116–3121, 1976
- [Mar96] MARTINEZ, M. L. B. und ZANETTA, L. *Comments on metal oxide surge arresters surges energy absorption capacity*. In: *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, Band 2, S. 498–501. 1996. ISSN 1089-084X
- [Mic70] MICHIO, M. *Non-linear resistor*, Februar 1970. Pr.: US Ser. Nr. 637492 16.05.1966
- [Ols89a] OLSSON, E. und DUNLOP, G. L. *Characterization of individual interfacial barriers in a ZnO varistor material*. In: Journal of Applied Physics, Band 66(8): S. 3666–3675, 1989
- [Ols89b] OLSSON, E. und DUNLOP, G. L. *The effect of Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content on the microstructure and electrical properties of ZnO varistor materials*. In: Journal of Applied Physics, Band 66(9): S. 4317–4324, 1989

- [Pik81] PIKE, G. E. *Electronic Properties of ZnO Varistors: A New Model*. In: Proceedings of the Materials Research Society, Band 5: S. 369–379, Januar 1981
- [Rei08] REINHARD, M. *Experimentelle Untersuchungen zum Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen von Metalloxidwiderständen eingesetzt in Hochspannungsnetzen unter Berücksichtigung eines komplexen Fehlerkriteriums*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Dezember 2008
- [Rin97] RINGLER, K. G.; KIRKBY, P.; ERVEN, C.; LAT, M. V. und MALKIEWICZ, T. A. *The energy absorption capability and time-to-failure of varistors used in station-class metal-oxide surge arresters*. In: IEEE Transactions on Power Delivery, Band 12(1): S. 203–212, 1997. ISSN 0885-8977
- [Roc09] ROCKS, A. *Einsatz von Metalloxid-Varistoren zum Überspannungsschutz pulsumrichtergespeister Drehfeldmaschinen*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Dezember 2009
- [Sak89] SAKSHAUG, E. C.; BURKE, J. und KRESGE, J. *Metal oxide arresters on distribution systems: fundamental considerations*. In: IEEE Transactions on Power Delivery, Band 4(4): S. 2076–2089, 1989. ISSN 0885-8977
- [Sch94] SCHAUMBURG, H. *Werkstoffe und Bauelemente der Elektrotechnik, Keramik*. Teubner, Stuttgart, fünfte Auflage, 1994
- [Shi79] SHIRLEY, C. G. und PAULSON, W. M. *The pulse-degradation characteristic of ZnO varistors*. In: Journal of Applied Physics, Band 50(9): S. 5782–5789, 1979. ISSN 0021-8979
- [Stu87] STUCKI, F.; BRÜESCH, P. und GREUTER, F. *Electron spectroscopic studies of electrically active grain boundaries in ZnO*. In: Surface Science, Band 189/190: S. 294–299, 1987. ISSN 0039-6028
- [Stu90] STUCKI, F. und GREUTER, F. *Key role of oxygen at zinc oxide varistor grain boundaries*. In: Applied Physics Letters, Band 57(5): S. 446–448, 1990. ISSN 0003-6951
- [Swe89] SWEETANA, A.; RADFORD, K.; JOHNSON, R. und HENSLEY, S. *High Energy Metal Oxide Valve Blocks*. In: Varistor Technology, Band 3: S. 240–247, 1989
- [Wan98] WANG, H.; BARTKOWIAK, M.; MODINE, F. A.; DINWIDDIE, R. B.; BOATNER, L. A. und MAHAN, G. D. *Nonuniform Heating in Zinc Oxide Varistors Studied*



*by Infrared Imaging and Computer Simulation.* In: Journal of the American Ceramic Society, Band 81(8): S. 2013–2022, 1998. ISSN 1551-2916

[Wil62] WILKS, S. *Mathematical statistics.* Wiley, 1962

[Won80] WONG, J. *Sintering and varistor characteristics of ZnO-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics.* In: Journal of Applied Physics, Band 51(8): S. 4453–4459, 1980



## Relevante Normen

- [IEC60143-2] Norm IEC 60143-2, ed. 2.0: 2012-12. *Series capacitors for power systems – Part 2: Protective equipment for series capacitor banks*
- [IEC60060-1] Norm IEC 60060-1, ed. 3.0: 2010-09. *High-voltage test techniques – Part 1: General definitions and test requirements*
- [IEC-37/416/FDIS] Normentwurf FDIS IEC 60099-4, ed. 3.0: 2014-03. *IEC 60099-4/Ed3: Surge arresters – Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems.* – als Norm veröffentlicht im Juni 2014
- [IEC60099-4] Norm IEC 60099-4, ed. 2.2: 2009-05. *Surge arresters – Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems*
- [IEC60099-5] Norm IEC 60099-5, ed. 2.0: 2013-05. *Surge arresters – Part 5: Selection and application recommendations*
- [IEC60099-8] Norm IEC 60099-8, ed. 1.0: 2011-01. *Surge arresters – Part 8: Metal-oxide surge arresters with external series gap (EGLA) for overhead transmission and distribution lines of a.c. systems above 1 kV*
- [IEC-37/417/FDIS] Normentwurf FDIS IEC 60099-9, ed. 1.0: 2014-03. *IEC 60099-9/Ed1: Surge arresters – Part 9: Metal-oxide surge arresters without gaps for HVDC converter stations.* – als Norm veröffentlicht im Juni 2014
- [IEEEC62.22-2009] Norm IEEE Std C62.22-2009 2009-07. *IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems*
- [IEEEC62.11-2012] Norm IEEE Std C62.11-2012 2012-12. *IEEE Standard for Metal-Oxide Surge Arresters for AC Power Circuits (>1 kV)*



## Veröffentlichungen als Autor oder Co-Autor

- [Cig13] CIGRÉ ARBEITSGRUPPE A3.17, HINRICHSSEN V. UND REINHARD M. (MIT UNTERSTÜTZUNG VON TUCZEK M. N.), TECHNISCHE BROSCHÜRE 544. *MO Surge Arresters – Stresses and Test Procedures, Kapitel 3: Energy handling capability of MO surge arresters*. Cigré, 2013
- [Den10] DENZ, F.; GJONAJ, E.; WEILAND, T.; TUCZEK, M. N. und HINRICHSSEN, V. *Electric and Thermal Reaction of Zinc Oxide to Current Impulses*. In: *30th International Conference on Lightning Protection, paper 6B-1331*. 2010
- [Göh10] GÖHLER, R.; SCHUBERT, M.; WECK, K. H.; HINRICHSSEN, V.; TUCZEK, M. N.; CLEMENS, M. und APPEL, R. *Special Requirements on Surge Arrester Design for UHV A.C. Systems above 800 kV System Voltage*. In: *Cigré Konferenz, Report A3-104-2010*. Cigré, 2010
- [Göh11] GÖHLER, R.; TUCZEK, M. N. und HINRICHSSEN, V. *Optimierung der Potentialverteilung von MO-Überspannungsableitern durch externe Steuerung*. In: *ETG-Workshop: Feldsteuernde Isoliersysteme, Werkstoffe, Design, Prüfung und Simulation*. ISBN 978-3-8007-3390-3. 2011
- [Hin09] HINRICHSSEN, V.; TUCZEK, M. N. und REINHARD, M. *Recent Experimental Findings on the Energy Handling Capability of Metal-Oxide Varistors for High-Voltage Applications*. In: *World Congress on Insulators, Arresters and Bushings*. Januar 2009
- [Hin12] HINRICHSSEN, V. und TUCZEK, M. N. *Surge arresters for insulation coordination in UHV power systems – related problems and solutions*. In: *Elektrotechnik und Informationstechnik: e & i*, Band 129(5): S. 326–331, 2012
- [Tuc09] TUCZEK, M. N.; REINHARD, M. und HINRICHSSEN, V. *Energieaufnahmevermögen von Metalloxidvaristoren eingesetzt in Überspannungsableitern elektrischer Energieversorgungsnetze*. In: *RCC*

*Fachtagung Werkstoffe „Forschung und Entwicklung neuer Technologien zur Anwendung in der elektrischen Energietechnik“.* Mai 2009

- [Tuc13a] TUCZEK, M. N. und HINRICHSSEN, V. *Recent Experimental Findings on the Single and Multi-Impulse Energy Handling Capability of Metal-Oxide Varistors for Use in High-Voltage Surge Arresters*, 2013. IEEE Transactions on Power Delivery, eingereicht und angenommen 18.09.2013. DOI: 10.1109/TPWRD.2013.2283911
- [Tuc13b] TUCZEK M. N. UND HINRICHSSEN V., TECHNISCHE BROSCHÜRE DER CIGRÉ ARBEITSGRUPPE A3.25, KAPITEL. *Energy handling capability of MO surge arresters*, eingereicht 22.10.2013. Veröffentlichung geplant für 2015.
- [Tuc14] TUCZEK, M. N.; BRÖKER, M.; HINRICHSSEN, V. und GÖHLER, R. *Experimental investigations on the effects of continuous operating voltage stress and a.c. energy injection on current sharing among parallel connected MO varistor columns (as used in FACTS) in a highly non-linear regime of the voltage-current-characteristic*, 2014. IEEE Transactions on Power Delivery, eingereicht und angenommen 18.10.2014. DOI: 10.1109/TPWRD.2014.2365045

## Vom Autor betreute studentische Arbeiten

- [Böl10] BÖLKE, M. *Experimentelle Untersuchung der Stromaufteilung parallel belasteter MO-Varistoren eingesetzt in elektrischen Energieversorgungsnetzen*. Bachelorarbeit, TU Darmstadt, 2010
- [Dür10] DÜREN, A. *Auswirkungen von Temperaturschiefverteilungen auf die thermische Stabilität eines 550 kV-Überspannungsableiters*. Studienarbeit, TU Darmstadt, 2010
- [Gie11] GIESSEL, M. *Doppelimpulsenergieaufnahmevermögen von MO-Varistoren*. Studienarbeit, TU Darmstadt, 2011
- [Gol09] GOLDE, K. *Auswirkungen repetierender Wechselstromenergieeinträge auf MO-Varistoren eingesetzt in Überspannungsableitern elektrischer Energieversorgungsnetze*. Studienarbeit, TU Darmstadt, 2009
- [Hal12] HALLAS, M. *Temperaturabhängigkeit im Durchbruchsbereich der UI-Kennlinie von kommerziellen MO-Varistoren der Hochspannungsebene*. Diplomarbeit, TU Darmstadt, 2012. Preisträger des IEEE PES Germany Chapter - Werner von Siemens - Best Diploma / Master Thesis Award 2013
- [Kac11] KACZMAREK, D. *Experimentelle Untersuchungen zur Abhängigkeit der Temperaturschiefverteilung sowie der thermischen Stabilität ungesteuerter Überspannungsableiter der Hochspannungsebene von der Umgebungstemperatur*. Studienarbeit, TU Darmstadt, 2011
- [Mus09] MUSCHALLE, S. *Thermische Untersuchungen an einem Überspannungsableiter der 1200 kV-Ebene*. Studienarbeit, TU Darmstadt, 2009
- [Nur11] NUREDINI, M. *Thermische Untersuchungen zur Reduktion des Steuerringsystems von Überspannungsableitern der Hochspannungsebene*. Diplomarbeit, TU Darmstadt, 2011

*Vom Autor betreute studentische Arbeiten*

- [Sch13] SCHWERT, M. *Praktische Untersuchung des Energieaufnahmevermögens von temperierten MO-Varistoren*. Bachelorarbeit, TU Darmstadt, 2013
- [Tsc11] TSCHONADSHIJ, D. *Aufbau und Inbetriebnahme eines Versuchsstandes zur beschleunigten Prüfung von Varistoren*. Studienarbeit, TU Darmstadt, 2011
- [Ufe11] UFER, M. *Untersuchung der Kennlinienalterung von MO-Varistoren durch Wechselstromenergieeinträge*. Masterarbeit, TU Darmstadt, 2011